

DEPARTEMENT DE GEOMATIQUE APPLIQUEE

Faculté des lettres et sciences humaines

Université de Sherbrooke

**Le développement d'une méthode pour quantifier la distribution spatiale de la
végétation en milieu forestier à l'aide du lidar terrestre**

FLORENTIN BOURGE

Candidat à la maîtrise en sciences géographiques

Cheminement de type recherche en télédétection

Richard Fournier : directeur de recherche (Université de Sherbrooke)

Jean-François Côté : codirecteur de recherche (Ressources naturelles Canada)

Décembre 2017

© Florentin Bourge, 2017

Résumé :

La surface foliaire des arbres est un des paramètres majeurs pour comprendre l'écosystème forestier. Par ailleurs, les données du lidar terrestre peuvent être utilisées pour estimer la surface et la distribution spatiale fine du feuillage et du bois dans la forêt. Malheureusement, ces données sont affectées par des problèmes d'occlusion et d'échantillonnage inégal. C'est pourquoi, ce projet vise à développer une méthode de normalisation des données du lidar terrestre afin de permettre une évaluation juste de la distribution 3D du matériel végétatif. Dès lors, la voxélisation du nuage de points en petits cubes élémentaires complétés par une technique d'interpolation pour les voxels trop occlus a été mise en place pour corriger ces effets. Toutefois cet ensemble de méthodes n'a jamais été vérifié, car il est très difficile de procéder à des mesures fines de distribution de la végétation *in situ*. Dans un premier temps, quatre maquettes qui reproduisent finement des placettes forestières d'inventaire ont été générées de manière à les comparer avec les résultats du processus de correction. Les résultats de cette première approche démontrent, que ce processus de correction permet de retrouver les profils verticaux de végétation avec plus de 90 % d'exactitude sur tous les emplacements forestiers mis à l'essai. Dans un second temps et pour appuyer ces premiers résultats, une méthode de normalisation a été expérimentée sur des nuages de points issus de forêts réelles. Cette deuxième partie de l'étude a été réalisée sur six placettes d'inventaire situées dans l'est du Québec, principalement composées de sapins et d'érables. L'objectif de ce jeu de données était de voir à quel point la méthode précédemment développée permettait de retrouver le profil de végétation de l'arbre cible avant le dégagement de la végétation occultante dans les conditions réelles. Les résultats montrent des corrélations des profils verticaux en moyenne autour de 70 % et allant jusqu'à 85 % dans le meilleur pour les profils exprimés en indice de surface foliaire, c'est-à-dire avant leur conversion en densité de surface totale (DST). Pour conclure, cette étude montre qu'il est possible de corriger significativement les biais relatifs à l'occlusion et à un échantillonnage inégal pour en déduire des profils de densité de la végétation réalistes et réutilisables. En outre, plusieurs défis restent à relever dans la quantification du matériel végétal à partir de l'utilisation du lidar en forêt. Par exemple, en développant des algorithmes d'interpolation capables de compenser la perte d'information quand la végétation ne laisse passer aucun rayon du lidar ou en améliorant l'estimation du feuillage en fonction des différentes espèces d'arbres.

Mots-Clés : lidar; occlusion; échantillonnage; PAD; attributs forestiers; inventaire forestier;

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Liste des Annexes.....	viii
Glossaire	ix
Remerciements.....	x
1. Introduction	1
1.1. L’inventaire forestier	2
1.2. Les attributs de la tige et ses mesures	3
1.3. Les attributs de la couronne de arbres.....	4
1.3.1. Les méthodes directes	4
1.3.2. Les méthodes semi-directes	5
1.3.3. Les méthodes indirectes	6
2. Problématique	7
3. Objectifs et hypothèses	8
4. Cadre théorique.....	10
4.1. Le capteur lidar	10
4.1.1. Le principe de mesure de distance en 3D	10
4.1.2. Les limites des systèmes lidar terrestre en forêt.....	12
4.1.3. Les stratégies d’acquisition multiscan	14
4.2. Le modèle L-Architect	18
4.3. Définition des surfaces foliaires (ISF / DST).....	20
4.3.1. Cas général pour les surfaces planes (feuillus)	20
4.3.2. Cas particulier pour les surfaces non planaires (conifères).....	20

4.4.	La mesure de l'ISF par télédétection	21
4.4.1.	Introduction de la loi de Beer-Lambert et application à la forêt	22
4.5.	L'algorithme de lancer de rayons (PBRT)	24
4.5.1.	Simulation d'un scan lidar	25
4.5.2.	Rendu graphique d'une maquette forestière.....	26
4.6.	La voxélisation	27
4.6.1.	Calcul de l'indice de densité relative (IDR).....	27
4.6.2.	Calcul de la DST par voxel	27
4.6.3.	Effet de l'occlusion.....	29
4.6.4.	Combinaison des points de vue	30
5.	Méthodologie.....	31
5.1.	Validation principale : données simulées.....	32
5.1.1.	Sélection et modélisation des peuplements.....	32
5.1.2.	Simulation lidar-t.....	33
5.1.3.	Opérations de correction	34
5.2.	Analyse principale	36
5.2.1.	Analyse des similitudes statistiques : <i>étape [12]</i>	36
5.2.2.	Études de sensibilité : <i>étape [13]</i>	36
5.3.	Décisions	37
5.4.	Analyse complémentaire : placettes forestières réelles (étapes 17 à 21)	37
5.4.1.	Sites d'étude	37
5.4.2.	Données utilisées	38
5.4.3.	Prétraitements des données	38
5.5.	Comparaison et analyse	38
5.5.1.	Problème d'alignement des grilles A et B.....	39

5.5.1.	Analyse comparative.....	40
5.5.2.	Analyse de sensibilité à la dimension de voxel	40
6.	Résultats et leur interprétation.....	41
6.1.	Génération des placettes et des données lidar-t de simulation	41
6.2.	Opérations de correction avec L-Vox	45
6.3.	Estimation de la densité de végétation.....	47
6.3.1.	Qualité des voxels connus.....	47
6.3.2.	Gestion des voxels avec une valeur d'IDR inconnue	48
6.3.3.	1 ^{er} résultat avec : L-Vox + (inconnus = 0)	49
6.3.4.	2 ^{ème} résultats avec : L-Vox + (inconnus = moy).....	50
6.3.5.	3 ^{ème} résultats avec : L-Vox + (inconnus = moy) + masque binaire	50
6.3.6.	Calcul de la DST.....	52
6.4.	Résultats de test sur des placettes réelles (IDR vs DST)	57
6.4.1.	Récapitulatifs des résultats traduits en DST.....	57
6.4.2.	Résultats favorables et biais provoqués par la méthode	60
6.4.3.	Résultats défavorables en raison de l'occlusion totale et des limites de l-vox	62
6.4.4.	L'effet de la résolution sur la voxélisation.....	63
7.	Discussion	64
7.1.	La réponse à l'occlusion.....	64
7.1.1.	La stratégie d'acquisition multiscan	64
7.1.2.	La quantification de la végétation	65
7.1.3.	Validation dans un environnement contrôlé sans biais.....	66
7.1.4.	Application dans des forêts réelles	67
7.2.	De l'IDR à la DST	67
7.3.	Importance pour caractériser la forêt	69

7.3.1.	Pour l'inventaire forestier	69
7.3.2.	Pour l'écologie forestière	69
7.3.3.	Pour le climat.....	70
8.	Conclusion.....	70
9.	Références	73
10.	Annexe.....	78
10.1.	Rappel des équations sur la distribution du feuillage.....	80
10.2.	Prérequis à l'utilisation de L-VOX	81

Liste des figures

1. Schéma de principe du capteur lidar à miroir tournant.....	11
2. Effet de l'occlusion sur le scan central d'une placette en forêt tropicale	13
3. Exemple de l'effet du vent sur des feuilles de 40 cm de long environ appartenant à un épiphyte de l'espèce <i>Anthurium hookeri</i> ou siguine rouge en français	14
4. Exemple de repère de type « cible réticule » placé dans une placette	15
5. Patron d'acquisition d'une placette forestière par un dispositif lidar terrestre	16
6. Nuage de point de la section transversale d'un tronc d'arbre vue du dessus	17
7. Modèle d'arbres provenant des résultats de simulation de 4 espèces de conifère	19
8. Représentation du feuillage (pousse) pour les quatre espèces de conifère	19
9. Absorption lumineuse dans une cuvette de liquide turbide (loi de Beer-Lambert).....	22
10. Illustration de la géométrie utilisée pour le calcul de l'ISF en forêt à partir d'instruments optiques (figure extraite de Leblanc 2014)	24
11. Surface sphérique d'une caméra de type environnement utilisée pour simuler le lidar-t	26
12. Schéma de principe d'un rendu graphique de type photographique avec PBRT	26
13. Schéma du calcul L-VOX pour déterminer l'indice de densité relative (IDR) de matériel dans un voxel (tiré de Durrieu et al. 2007)	27
14. Schéma d'application de la loi de Beer-Lambert à l'échelle du voxel	28
15. Schéma sur l'effet de l'occlusion (tiré de Durrieu et al. 2008)	29
16. Diagramme méthodologique principal de l'étude.....	31
17. Canevas de position des scans lidar-t	34
18. Techniques de remplissage des voxels de valeur inconnue (voxel non suffisamment sondé) avec l'aide de la grille binaire	35
19. Diagramme méthodologie de la comparaison des nuages de points avant et après dégagement	39
20. Aperçu de la placette n°19502312 avant et après la simulation multiscan lidar.....	42
21. Densité de points lidar versus la densité de végétation de référence (L-Architect)	44
22. Comparaison des profils verticaux d'IDR selon deux modes de correction des voxels occlus avec les profils de DST de référence (L-Architect) pour une résolution de 10 cm par voxel	51
23. Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (10100317 à 15 cm)	54

24.	Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (18600518 à 10 cm)	55
25.	Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (18900805 à 20 cm)	56
26.	Profils verticaux de PAD calculés par L-vox avant vs. après dégagement d'un arbre cible (Sapin / Sapin III / 1 m)	62
27.	Profils verticaux de PAD calculés par L-vox avant vs. Après dégagement d'un arbre cible (Sapin / Sapin II / 10 cm)	63

Liste des tableaux

1.	Caractéristiques des quatre peuplements forestiers de référence	41
2.	Nombre total de points et proportion pour chaque scan et par placette.	42
3.	Hauteur Z (en m) des pics maximums des courbes de Weibull ajustées de la Figure 21 avec le même code couleur	45
4.	Caractéristiques par placette des grilles de voxels (10 x 10 x 10 cm) en sortie de L-Vox, avec le nombre rayons entrants dans un voxel tel que $n_e = b - c$ (d'après la Figure 13). Les pourcentages sont calculés par rapport à la totalité des voxels de la grille.	46
5.	Pourcentage de voxels identifiés comme renfermant du matériel selon trois grilles de scène	46
6.	Résultat des régressions linéaires sur les voxels traitées uniquement par L-Vox.....	48
7.	Résultat des régressions linéaires entre les profils verticaux (1D) des données de référence et voxelisées.....	49
8.	Résultats des corrélations linéaires entre les profils verticaux de DST de L-vox vs L-Architect	52
9.	Résultats de comparaison des profils verticaux de DST d'un arbre cible avant et après le dégagement de la végétation périphérique.....	57
10.	Résultats de comparaison des profils verticaux d'IDR bruts d'un arbre cible avant et après le dégagement de la végétation périphérique.....	59

Liste des Annexes

Figure

A1. Rendu 3D des quatre placettes forestières de références avec PBRT.....	78
A2. Diagramme méthodologique de comparaison des profils verticaux.....	79
A3. Diagramme méthodologique de comparaison des projections 2D	79
A4. Densité de probabilité en fonction de l'inclinaison des feuilles.	80

Tableau

A1. Formules de distribution du feuillage (Weiss et al. 2004), voir figure 24. $g(\theta_1)$ est la fonction de distribution de l'inclinaison du feuillage (en prenant une fonction de distribution de l'angle azimutal des feuilles uniforme); ALIA signifie Average Leaf Inclination Angle (e.i. angle moyen d'inclinaison des feuilles) θ_1 ; et μ et ν sont les paramètres de la distribution beta...	80
---	----

Glossaire

DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
DSF	Densité de surface des feuilles
DST	Densité de surface totale
IDR	Indice de densité relative
IFN	Inventaire forestier national
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
ISF	Indice de surface des feuilles
IST	Indice de surface totale
L-Architect	Lidar data to tree Architecture
L-Vox	Lidar data voxelization
Lidar	Light detection and ranging
Lidar-t	Lidar terrestre
MNH	Modèle numérique de hauteur
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
PBRT	Physically Based Ray Tracer
PEP	Placette à échantillonnage permanente
PET	Placette à échantillonnage temporaire
Voxel	Pixel en volume

Remerciements

Merci à Richard Fournier, pour son rôle de directeur depuis le jour de mon arrivée à l'université jusqu'au dépôt final de mon mémoire pour lequel il a su se montrer soutenant et patient. Je tiens aussi à le remercier pour m'avoir ouvert les portes du monde de la recherche forestière ainsi que pour ses multiples propositions de stages et de conférences au Québec et en France.

Merci aux membres du jury : Richard Fournier, Jean-François Côté, Sylvain Blanc et Jérôme Théau pour le temps consacré à la relecture de mon mémoire ainsi que pour leurs remarques avisées.

À *Sherbrooke*, je remercie toutes les personnes, amis, professeurs, étudiants du bureau des docs, binômes de cours, colloques qui ont pu m'aider ou avec qui j'ai simplement partagé des moments inoubliables pendant ceux deux années passées à l'Université de Sherbrooke.

À *Québec*, merci à Jean-François Côté, mon codirecteur, de m'avoir accueilli et initié aux algorithmes de simulation et de lancer de rayons mais aussi pour la qualité de ses remarques et de ses interventions.

À *Nancy*, merci à Alexandre Piboule pour sa grande vivacité d'esprit, son pragmatisme et ses explications très pertinentes autour des algorithmes mis en œuvre dans Computree. Merci aussi à toute l'équipe de l'ONF de Nancy pour son accueil très sympathique.

À *Rimouski* et à *Montréal* : merci à toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger à l'occasion du CEF et plus particulièrement aux étudiants de l'équipe de Robert Schneider comme Martin-Ducup à qui je dois une partie du matériel d'étude utilisé dans ce mémoire.

À *Montpellier*, merci à Sylvie Durrieu, Eloi Grau et Marc Bouvier de l'IRSTEA pour leur professionnalisme, leur rigueur scientifique et leur accueil chaleureux.

À *Pointe-à-Pitre*, merci à Enguerran Grandchamp et Alain Rousteau de l'Université des Antilles pour le temps qu'ils nous ont consacré sur le terrain mais aussi pour leur compagnie et leur magnifique accueil.

Pour finir, j'aimerais remercier ma famille et en particulier ma mère et mon père qui ont toujours cru en moi et qui restent des supports indéfectibles dans les moments les plus difficiles.

1. Introduction

Les forêts recouvrent près de 30 % des terres émergées de la Terre, ce qui représente une surface totale d'environ 4 milliards d'hectares selon les définitions. Elles constituent, pour de nombreux pays, à la fois une importante source de richesses grâce aux produits qui en sont issus et à l'attractivité touristique qu'elles génèrent. Elles sont aussi un milieu naturel complexe à préserver. Par exemple, les forêts sont liées aux dynamiques climatiques et environnementales mondiales en raison de la photosynthèse qui donne à la canopée la capacité de capter puis de stocker le dioxyde de carbone. En effet, cette réaction chimique permet aux plantes chlorophylliennes et notamment aux arbres d'absorber le rayonnement solaire, de transpirer de la vapeur d'eau et de produire du dioxygène (Baldocchi & Harley, 1995; Sellers et al., 1997). Ainsi, à l'échelle régionale, des pays et des continents, ces forêts représentent non seulement d'importants puits de carbone mais aussi des acteurs dynamiques dans les grands enjeux climatiques et énergétiques actuels.

Pour réussir à gérer la ressource forestière de manière productive et durable, il est nécessaire de pouvoir l'identifier, la caractériser et la quantifier régulièrement. Pour cela, des attributs ont été mis en place afin de décrire au mieux les caractéristiques physiques de la forêt et de mettre au point des techniques pour pouvoir les mesurer en fonction des besoins. À cet égard, différentes organisations en charge de la gestion des forêts à travers le monde procèdent à la mesure de ces attributs de manière à constituer un inventaire forestier représentatif. Les données que collecte l'inventaire forestier permettent de connaître l'état, l'évolution dans le temps et les potentialités de la forêt. Par exemple, au Québec, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) réalise un inventaire écoforestier sur un territoire situé au sud du 52^e parallèle qui s'étale sur près de 588 200 km². Cette superficie est équivalente à celle de la France métropolitaine dont les forêts recouvrent près de 30 % du territoire auxquels s'ajoutent 85 000 km² de surfaces forestières situées dans les départements et territoires d'outre-mer ce qui représente un total de 246 640 km². Les forêts françaises sont répertoriées par l'Inventaire forestier national (IFN) sous la direction de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN).

1.1. L'inventaire forestier

En général, l'inventaire forestier consiste à réaliser une collecte systématique des données écologiques et dendrométriques sur les différentes caractéristiques du milieu forestier. Par ailleurs, cette collecte d'information est modulée par l'organisme gestionnaire pour répondre à ces besoins tout en prenant en compte ses contraintes et ses moyens. Par exemple, le guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier publié en 2014 par le MFFP (Méthot et al., 2014) est un document qui relate de manière exhaustive les techniques de mesures et les méthodes d'inventaires utilisées au Québec actuellement. Ces mesures servent à connaître les ressources en bois (nombre de tiges, volume, hauteur, diamètre à hauteur de poitrine) ainsi que l'état plus général des forêts (superficie, composition, densité, âge, structure, surface foliaire, type de sol). Certaines mesures d'inventaires difficiles à mesurer sur le terrain sont déduites à partir d'autres mesures plus couramment réalisées, grâce à des équations mathématiques appelées relations allométriques (Pretzsch, 2009; Picard, 2012). Par exemple, certains modèles prédictifs permettent d'estimer le volume et la biomasse d'un arbre à partir des mesures de sa hauteur et de son DHP. Les différentes méthodes d'inventaire employées à travers le monde se distinguent en deux grandes catégories. Il y a les inventaires pieds par pieds et les inventaires statistiques. Dans le premier cas, tous les arbres d'une parcelle forestière sont identifiés et recensés. Cette méthode est donc très précise mais quasiment irréalisable sur de grands ensembles forestiers. Dans le second cas, plus efficace et réaliste pour de grandes surfaces forestières suffisamment homogènes, un recensement est réalisé sur des petits sous-ensembles d'arbres localisés sur un ou plusieurs sites et répartis aléatoirement ou selon un maillage régulier à travers les peuplements à l'étude. Ces sites forestiers peuvent être soit des placettes à échantillonnage permanent (PEP) (Boudreau & Philibert, 2016a) soit des placettes à échantillonnage temporaire (PET) (Boudreau & Philibert, 2016b). Généralement, des PEP sont utilisées pour des études sur la dynamique des forêts à long terme. Les dimensions des PEP (ou PET) sont établies par les organismes gestionnaires. Par exemple, le MFFP réalise des placettes circulaires de 400 m², soit 11,28 m de rayon (Méthot et al., 2014, p. 37-38). Par la suite, grâce à des modèles statistiques, les métriques enregistrées sur les PEP et PET sont étendues à l'ensemble des peuplements concernés. Le but est de mettre à la disposition des gouvernements ou des organisations (de recherche, sylvicole) des données utiles et fiables sur la forêt. Ces institutions s'en servent ensuite pour gérer adéquatement le territoire et ses ressources ou pour mener des études forestières, écologiques et environnementales.

L'inventaire forestier est supporté par un tissu d'acteurs spécifiques dont les principaux sont les organismes gouvernementaux comme le MFFP ou l'IFN, les entreprises liées à l'exploitation du bois et le monde de la recherche en foresterie, en biologie et en sciences géographiques. Bien que ces acteurs aient des objectifs différents, ils travaillent en synergie pour récolter, gérer et exploiter les données de l'inventaire forestier en fonction de leurs intérêts communs. D'une part, les professionnels de la forêt s'intéressent généralement à la mesure d'attributs forestiers liés à l'exploitation des ressources en bois. Ces attributs incluent entre autres le diamètre de la tige à hauteur de poitrine, la hauteur de l'arbre, la courbure de l'arbre, le volume marchand de bois de tige et la branchaison. Par ailleurs, les entreprises liées à l'exploitation du bois partagent aussi leurs données avec des chercheurs afin par exemple, d'estimer l'évolution de la ressource ou d'étudier l'impact d'une maladie sur la production. D'autre part, le monde de la recherche s'intéresse de par sa nature à une palette très large d'attributs forestiers. De fait, les chercheurs s'intéressent aussi à des attributs moins stratégiques du point de vue de l'industrie forestière comme ceux liés à la couronne de l'arbre, à la structure de la canopée ainsi qu'à la surface, à la répartition et à l'orientation des feuilles (Parker, 1995). Globalement, tous ces paramètres sont utiles à l'ensemble des acteurs forestiers car ils permettent d'avoir accès à suffisamment d'information pour fournir une donnée utile à chacun tout en donnant la possibilité d'alimenter des modèles prédictifs afin de modéliser l'évolution de la ressource (Hopkinson, Chasmer, & Hall, 2008).

1.2. Les attributs de la tige et ses mesures

Les principaux attributs structuraux mesurés dans une placette d'inventaire sont la disposition des tiges (tree map), le diamètre de la tige à hauteur de poitrine (DHP; mesuré à 1,3 m du sol), la hauteur totale des arbres et leur surface terrière mais aussi la configuration du terrain. L'approche conventionnelle à ce jour pour ces mesures consiste à utiliser des outils de mesure directe. En effet, les techniciens forestiers responsables de ces mesures vont utiliser des appareils qui nécessitent des manipulations pour chaque arbre comme : le ruban diamétral, la jauge d'angle, le télémètre, le compas forestier ou l'inclinomètre, mais aussi des boussoles, et des GPS. De surcroît, les tâches de ces techniciens sur le terrain peuvent s'avérer longues, répétitives, d'une précision variable, parfois destructives et surtout limitées à certains attributs. D'un autre côté le lidar (*light detection and ranging*) aérien est capable de couvrir de grandes superficies pouvant aller d'un à plusieurs

dizaines de kilomètres carrés et d'acquérir une grande quantité de données brutes sur la forêt de l'ordre de 5 à 10 points /m². Cependant, les mesures obtenues après l'analyse des nuages de points se limitent à certains attributs comme la hauteur des arbres et le profil de la canopée (Lovell, Jupp, Culvenor, & Coops, 2003). En effet, le lidar aérien a difficilement accès aux attributs de la tige à cause de l'occlusion des houppiers et d'une trop faible résolution spatiale (Chasmer, Hopkinson, & Treitz, 2004). Enfin, le lidar dans sa version terrestre (lidar-t) donne la possibilité de mesurer rapidement et systématiquement tous ces attributs élémentaires comme le DHP, le volume marchant de bois de tige ou le positionnement précis des troncs. De plus, le lidar-t permet de rajouter des attributs structuraux plus complexes comme le défilement de la tige, le rayon de courbure, la branchaison et un modèle numérique de terrain (MNT) précis (Thies, Spiecker, & Str, 2000; Hopkinson, Chasmer, Young-pow, & Treitz, 2004).

1.3. Les attributs de la couronne de arbres

La couronne des arbres, aussi bien pour les feuillus que pour les conifères est une source d'information majeure pour déterminer la santé du spécimen, sa maturité, sa croissance et ses capacités d'échanges chimiques et thermiques avec l'environnement. Par exemple, la surface, la distribution et la densité du feuillage sont à l'origine de différents indices comme l'indice de surface foliaire (ISF) aussi connu sous son appellation anglaise de Leaf Area Index (LAI). Parmi les nombreux attributs de la couronne des arbres il est courant d'avoir à mesurer le volume, la densité, le ratio hauteur sur largeur, l'indice d'ouverture, l'indice de compétition (Martin-ducup, Schneider, & Fournier, 2016), etc. Les nombreuses méthodes qui prétendent à mesurer les attributs de la couronne des arbres se distinguent en trois approches différentes. Il y a les méthodes directes, semi-directes et indirectes (Béland et al., 2014a). Weiss, Baret, Smith, Jonckheere, & Coppin, 2004 et Seidel, Fleck, Leuschner, & Hammett, 2011 proposent une revue de la littérature sur ce qui a trait aux différentes méthodes de mesure du LAI.

1.3.1. Les méthodes directes

Les méthodes directes consistent à réaliser des mesures dans l'arbre ou à prélever l'ensemble des feuilles appartenant à cet arbre, à partir d'une collecte sur pieds ou au sol si son feuillage est caduc

ou à cause d'une maladie (Hall et al., 2003). Dans le cas où les feuilles sont prélevées dans l'arbre, une des solutions consiste à étager la couronne en plusieurs couches (Hosoi & Omasa, 2007). Le calcul de la surface foliaire de chaque couche présenté dans l'équation (1) (Béland et al., 2011) s'obtient grâce au ratio du poids total des feuilles sèches d'une couche W_{Couche} sur le poids précis de quelques feuilles aléatoirement sélectionnées dans cette couche $W_{échantillon\ de\ feuilles}$. La mesure de la surface de ces quelques feuilles $A_{échantillon\ de\ feuilles}$ permet de retrouver la surface totale des feuilles de la couche A_{Couche} en la multipliant avec le ratio des poids précédemment calculé.

$$A_{Couche} = \frac{W_{Couche}}{W_{échantillon\ de\ feuilles}} \cdot A_{échantillon\ de\ feuilles} \quad (1)$$

Ceci suppose donc qu'il y a une forte corrélation entre le poids et la surface des feuilles. Les méthodes directes demandent donc beaucoup de temps et de manipulations. De plus, comme pour la mesure des attributs structuraux du paragraphe précédent, ces mesures peuvent être destructives et elles ne garantissent pas l'exactitude du résultat. Par exemple, quand les feuilles se dessèchent ou se rétractent une fois récoltées, leur surface et leur poids diminue ce qui entrave la mesure de la surface des feuilles. Cependant, elles sont quand même utilisées comme données de référence, car il est généralement admis qu'elles sont plus précises que les méthodes semi-directes ou indirectes. Ces données sont utilisées pour tester et calibrer de nouveaux outils de mesure non destructifs par exemple.

1.3.2. Les méthodes semi-directes

Les méthodes semi-directes requièrent d'opérer directement sur l'arbre, mais il n'y a pas de récolte totale ou partielle du feuillage. C'est par exemple le cas de la méthode des « points-contacts » (Jonckheere et al., 2004) qui consiste à compter le nombre de points de contact du feuillage sur une sonde qui est érigée à travers la couronne. Cette méthode procure des données statistiques locales qui sont ensuite généralisées. Une autre méthode semi-directe consiste à utiliser des relations dites « allométriques ». Ces relations permettent de relier statistiquement des variables à prédire non mesurables ou difficilement (tel que l'ISF ou le volume marchand de bois) avec des mesures classiques faciles à obtenir comme le type d'arbre, le DHP ou la hauteur totale de l'arbre. Ces

méthodes sont donc non-destructives, mais elles restent chronophages, dépendantes des erreurs de mesure et de la formule mathématique employée.

1.3.3. Les méthodes indirectes

La plupart des méthodes indirectes se basent sur des techniques de télédétection en mesurant la lumière transmise à travers la canopée, principalement avec des capteurs photosensibles (voir section 4.4). Ces méthodes sont réparties en deux catégories selon la source de rayonnement. Si cette source est le soleil, la méthode est dite passive (par exemple la photographie) mais si la source est générée spécialement pour la mesure (rayon laser, onde radar) la méthode est dite active, comme pour le lidar. Dans les deux configurations, les mesures indirectes sont de plus en plus utilisées en raison de leur large rayon d'action et à leur capacité d'accéder à des métriques complexes avec des moyens de mesure peu ou pas invasifs. Une grande variété de dispositifs aussi bien passifs qu'actifs est utilisée pour réaliser des mesures indirectes sur la couronne des arbres. Le choix du dispositif varie en fonction de la surface à couvrir et des attributs forestiers à mesurer. À très grande échelle, des capteurs embarqués sur des satellites permettent de mesurer certains paramètres forestiers comme le LAI depuis l'espace. À plus petite échelle, sur le terrain divers dispositifs tels que le LAI-2000¹ (LICOR, 1991), le Tracing Radiation and Architecture of Canopies (TRAC) (Chen & Cihlar, 1995) ou la photographie hémisphérique (Leblanc, 2014) ont été largement utilisés pour mesurer la fraction de trouée selon une vision hémisphérique de manière à en déduire la surface du feuillage à l'intérieur de son périmètre. Progressivement, les lidars terrestre et aérien prennent de plus en plus de place dans le paysage de la télédétection appliquée à la recherche forestière. Les méthodes indirectes sont intimement liées à des considérations de physique de la télédétection et en particulier à certains modèles de transfert radiatif à travers la canopée (voir section 4.4). Depuis les années 2000, le lidar est devenu progressivement un outil pour étudier les écosystèmes de la forêt (Lefsky et al., 1999, 2002). Le lidar fonctionne sur le même principe général que le radar, mais dans les longueurs d'onde du visible ou du proche infrarouge (Hopkinson et al., 2004), c'est-à-dire généralement à une longueur d'onde spécifique entre 650 nm et 1500 nm selon l'unité laser utilisée.

¹ Plant Canopy Analyzer LAI-2000 de Licor © : <https://www.licor.com>

2. Problématique

Les données que génère le lidar-t ne sont pas directement exploitables pour répondre aux besoins de l'inventaire forestier. Les problèmes rencontrés sont liés aux propriétés physiques du capteur ainsi qu'à la complexité de la forêt qui n'a pas été envisagée à la conception des premiers capteurs. Les faisceaux lidar envoyés dans des longueurs d'onde autour de $1\mu\text{m}$ (Fröhlich & Mettenleiter, 2004) sont fortement réfléchis et absorbés, mais très peu transmis dans les milieux forestiers. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle cette gamme de longueurs d'onde est employée car son but est avant tout de d'identifier la distribution spatiale des éléments de végétation grâce à la réflexion de ces faisceaux à leur surface. Par conséquent, ce procédé a l'inconvénient de générer des ombres importantes dans les endroits non sondés derrière les composantes du couvert forestier qui reflètent totalement les rayons (Van der Zande, Hoet, Jonckheere, Van Aardt, & Coppin, 2006; Zheng & Moskal, 2009). Les composantes opaques sont donc responsables d'une occlusion qui entraîne des zones aveugles, dénuées de toute donnée, ce qui nuit à la qualité des mesures extraites du nuage de points lidar-t. Une solution fréquemment utilisée pour réduire les zones d'occlusion implique de multiplier le nombre d'acquisition selon plusieurs points de vue. Pour cela, une approche assez fréquente consiste à placer le lidar-t sur les quatre rebords (ou coins) de la placette ainsi qu'en son centre (Simonse et al., 2003). Cette pratique permet une réduction du problème d'occlusion local ou zonal à l'aide de plusieurs balayages. Par contre, la multiplication des balayages lidar-t entraîne une densité d'échantillonnage inégale et donc une perception biaisée de la densité du matériel végétal réel (Lovell et al., 2003; Weiss et al., 2004).

Pour contrer les problèmes d'occlusion et de d'échantillonnage inégal, différentes études dont celle utilisée dans l'algorithme L-Vox (Durrieu et al., 2008; Côté et al., 2009) suggèrent de diviser l'espace en une matrice de cubes élémentaires appelés voxels afin de procurer une valeur ou indice de densité par voxel (Chasmer et al., 2004; Hosoi & Omasa, 2006). La valeur de densité de végétation dans ce cube se calcule par le rapport du nombre de faisceaux intercepté dans le voxel sur le nombre total de faisceaux qui le traversent. Dans cette étude, sont pris en compte, le nombre total de retours de rayons en fonction du nombre de faisceaux qui traversent un cube. Or, ce dernier nombre varie en fonction des obstacles précédemment rencontrés par les faisceaux émis par le lidar-t (Durrieu et al., 2008). L'ensemble des voxels retenus couvre la zone d'étude sous la forme

d'une matrice 3D. Les valeurs en densité des voxels issus de L-Vox sont utilisées en assumant que ce processus rectifie les problèmes d'occlusion et de d'échantillonnage inégal. Néanmoins, cette prétention n'a jamais été formellement validée. Elle est pourtant essentielle pour extraire des mesures d'attributs forestiers à partir du nuage de points lidar-t.

Plusieurs éléments techniques peuvent contribuer à un écart entre les densités estimées par L-Vox et ce qui existe vraiment dans une scène forestière. En effet, d'autres imprécisions interviennent avant, pendant et après le processus de voxélisation. Dès la phase d'acquisition, le lidar-t enregistre une quantité significative de points retournés dans le vide (atmosphère). Ces points, facilement identifiables par leur faible valeur de réflectance sont retirés du nuage de points 3D par seuillage. Ce prélèvement de points est réalisé en assumant que leur répartition est régulière dans l'espace. Par conséquent, il convient de s'assurer qu'ils affectent le calcul de densité de manière constante pour tous les voxels. En outre, le calcul L-Vox d'une placette est d'abord effectué sur chaque scan indépendamment les uns des autres. Puis, pendant le processus de création de la grille 3D finale, la valeur de densité la plus réaliste de chaque voxel est sélectionnée parmi tous les scans. Il reste à s'assurer que ce choix de valeur convient bien à corriger les effets de l'occlusion. Sans compter que la densité réelle de faisceaux émis par le capteur et la densité théorique utilisée dans le calcul L-Vox peut aussi présenter des différences significatives. De surcroît, la taille du faisceau lidar-t ainsi que la résolution de la grille de voxels ont un impact sur le calcul de l'indice de densité (Béland et al., 2011). Enfin, l'hypothèse de turbidité qui relie l'indice de densité à la surface de végétation réelle grâce à la loi de Beer-Lambert peut aussi apporter un biais (Béland et al., 2014a). Au regard de l'ensemble de ces imprécisions et du début de solution apporté par l'algorithme L-Vox, le problème reste entier, car il n'existe à ce jour aucune méthode validée de rectification des données lidar terrestre pour contrer l'impact négatif de l'occlusion et de l'échantillonnage inégal du signal lidar en milieu forestier.

3. Objectifs et hypothèses

L'objectif principal de ce projet est de quantifier la distribution spatiale de la végétation en milieux forestiers jusqu'à retrouver des profils verticaux qui s'approchent à plus de 90 % des profils de référence. Plus particulièrement, les nuages de points du lidar-t doivent être traités pour retrouver

la quantité de matériel tel qu'il existe dans la placette forestière, tout en cherchant à réduire les biais importants de l'occlusion et de l'échantillonnage inégal. Cet objectif principal se décompose en trois sous-objectifs. Tout d'abord il requiert l'utilisation de données de références fiables et précises, ici des maquettes forestières virtuelles qui pourront remplir ces conditions. Le premier objectif vise donc de reproduire un gradient représentatif de placettes forestières. Ensuite, comme deuxième sous-objectif, une nouvelle méthode sera développée, basée sur la densité relative du matériel dans un voxel, pour procurer une représentation fiable de la distribution du matériel en milieu forestier. Des valeurs de densité seront calculées par l'algorithme L-Vox (Durrieu et al., 2008), mais il restera à voir si seul cet algorithme suffit pour une représentation réaliste. Le troisième sous-objectif est de valider cette méthode en démontrant qu'elle permet de retrouver la quantité de matériel végétal, en particulier la densité de surface totale, dans toutes les configurations de forêt précédemment sélectionnées.

L'hypothèse principale est que l'utilisation d'une gamme représentative de scènes forestières finement modélisées dans un environnement virtuel (Côté, Fournier, & Egli, 2011; Côté, Fournier, Frazer, & Niemann, 2012) permettra de valider ou de qualifier l'erreur de calcul de l'indice de densité par voxélisation d'un nuage de points lidar- t (Durrieu et al., 2008). Cette première hypothèse en implique trois autres :

- Le nuage de points 3D obtenu par simulation de scans lidar-t sur une placette virtuelle présentera les mêmes défauts (occlusion, échantillonnage inégal) que ceux issus d'un nuage de points 3D réels acquis par un lidar-t en placette forestière in situ;
- Les conditions de turbidité du couvert forestier et l'application de la loi de Beer-Lambert sont satisfaisantes pour déduire la densité de surface totale (DST) à partir de la méthode proposée par Béland et al. (2014a);
- Dans les zones de forte occlusion où il n'y a pas assez de signal pour établir une densité relative du voxel, une technique simple de normalisation pourra permettre d'attribuer des valeurs en densité et d'améliorer l'estimation de distribution du matériel forestier.

4. Cadre théorique

4.1. Le capteur lidar

Le lidar mesure le rayonnement électromagnétique retourné par l'environnement par rapport à ce qu'il a émis sous forme de faisceaux laser. Le signal lidar est associé à un mécanisme de balayage (habituellement un miroir rotatif). Dans le cas des unités aérienne, le balayage permet le sondage de points perpendiculaire à la ligne de vol de l'avion à +/- 20 ou 30 degrés du nadir. Pour les unités terrestres (lidar-t) le balayage du faisceau laser par miroir et le déplacement en azimuth de la tête du capteur permet d'échantillonner tout l'espace hémisphérique autour de l'appareil selon les coordonnées sphériques. Le lidar est donc un système actif, ce qui diffère des mesures prises par les systèmes passifs qui dépendent plutôt de la transmission et diffusion du rayonnement solaire à travers la canopée (Leblanc et al., 2005; Seidel et al., 2011). La distance exacte du matériel qui compose la canopée est calculée pour chaque point de mesure par faisceau lidar selon une méthode de mesure de temps de vol ou du déphasage de l'onde laser retournée (Lichti, Gordon, & Stewart, 2002). Au sein d'une placette forestière, le lidar enregistre les coordonnées tridimensionnelles (3D) des éléments des composantes d'un peuplement forestier sur lesquels les rayons se sont réfléchis (Lichti et al., 2002). Grâce au nuage de points ainsi obtenu, il est prévisible que des algorithmes adaptés au traitement des nuages de points procurent des mesures structurelles plus exactes que celles déjà disponibles dans l'inventaire forestier traditionnel. Le lidar permettra aussi d'ajouter d'autres mesures structurelles utiles (Hopkinson et al., 2004).

4.1.1. Le principe de mesure de distance en 3D

Différentes techniques peuvent être utilisées pour réaliser une mesure de distance à partir de l'émission d'un faisceau laser. L'objectif commun est de pouvoir sonder l'espace en 3D tout autour du scanner de manière suffisamment rapide et précise. Pour réaliser cette mesure certains modèles utilisent des galvanomètres, d'autres un miroir polygonal rotatif ou encore un système de triangulation stéréoscopique (Wehr, 2008). Cependant, la technique privilégiée est celle du miroir semi-transparent fixé sur un arbre rotatif en raison de ses bonnes performances autant en termes de vitesse que de précision (figure 1). Cette technique est donc constituée d'un arbre central qui tourne autour d'un axe horizontal ce qui permet le balayement de la scène dans le plan vertical. Chaque

tour constitue une ligne qui commence à 25° de la normale pour finir à 335° . D'autre part, cet arbre rotatif est fixé au centre d'une plateforme qui tourne sur elle-même sur 360° autour de l'axe vertical de l'appareil ce qui permet de balayer la scène dans le plan horizontal. Le nombre de rayon laser impulsé par ligne ainsi que la vitesse de rotation horizontale conditionnent la résolution angulaire de la donnée. Ces deux mouvements de rotations combinés permettent d'observer l'ensemble de la scène environnante hormis un cône aveugle d'environ 50° situé sous l'appareil.

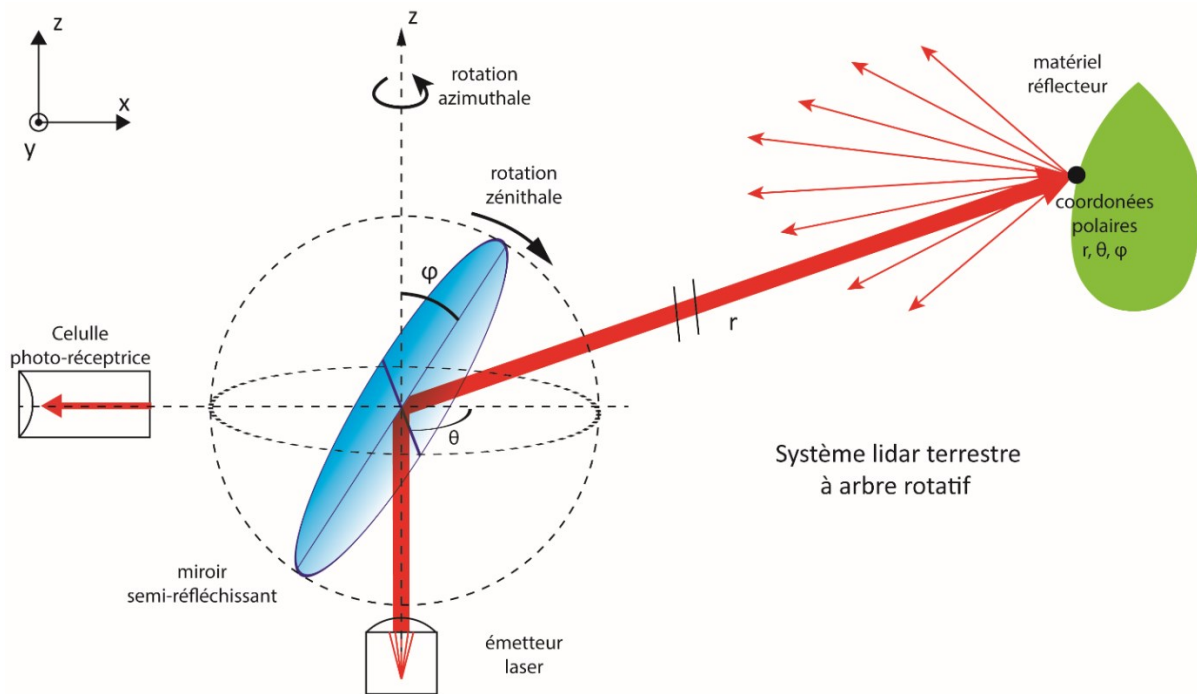


Figure 1 : Schéma de principe du capteur lidar à miroir tournant.

r est la distance entre le centre du miroir et le point de réflexion du faisceau lidar. φ est son angle zénithal et θ est son angle azimutal. Des calculs de translation sont ensuite réalisés par le lidar pour obtenir des points dans le repère cartésien (x, y, z) . La longueur d'onde du faisceau laser appartient généralement au proche infrarouge entre 650 nm et 1500 nm selon les modèles. Un scanner lidar peut acquérir plus de 500 000 points par seconde avec une résolution angulaire de l'ordre de $0,036^\circ$.

La mesure de distance selon ce dispositif peut être acquise soit par calcul du temps de vol soit par mesure de déphasage. Dans le premier cas, le temps que mets l'onde à atteindre un obstacle puis à revenir est enregistré ce qui permet d'en déduire la distance parcourue grâce à la vitesse de propagation de l'onde lumineuse dans l'air (proche de la célérité de la lumière dans le vide). La

deuxième méthode consiste à mesurer le décalage de phase entre l'onde émise et l'onde reçue et d'en retirer la distance du point de réflexion grâce à la vitesse constante de rotation de phase de l'appareil. En cas de retours multiples, avec la technique de calcul du temps de vol, il est possible de prendre en compte d'un à plusieurs (par ex. huit) retours par faisceau émis selon les modèles de scanner. Certains modèles de scanner qui utilisent le temps de vol permettent même l'enregistrement de la totalité de l'onde reçue (appelé en anglais : « full waveform »), et ainsi d'avoir accès à la forme d'onde pour estimer la distance des obstacles rencontrés et l'intensité des retours en continu.

Pour chaque mesure de distance enregistrée (r) sont associés, la valeur de l'angle zénithal (φ) et azimutale (θ) du miroir au moment du lancer de rayon ce qui permet d'en déduire les coordonnées polaires réelles (r' , φ' , θ') du point sur lequel l'onde s'est réfléchi. Un simple calcul trigonométrique permet de changer de repère pour en retirer les coordonnées cartésiennes du point (x , y , z). Ce processus est ensuite répété à une cadence élevée, par exemple 500 000 fois par seconde pour obtenir une résolution dite « moyenne » de 1 rayon lancé tous les 0.036° .

4.1.2. Les limites des systèmes lidar terrestre en forêt

Le milieu forestier peut être très complexe et il mène souvent la technologie lidar à ses limites. Dans le cas d'un simple scan au milieu d'une placette d'inventaire, l'occlusion est le problème majeur. Cette occlusion apparaît derrière tous les objets frappés par des faisceaux (voir les exemples de la figure 2). Ce sont donc une multitude de zones non sondées qui empêchent d'obtenir une détection fiable et uniforme du milieu. Par exemple (figure 2.b), les troncs se transforment en surface partiellement cylindrique et trouée par l'ombre des feuilles qui se trouvent sur le chemin des faisceaux émis par le lidar. De plus, certains troncs peuvent totalement disparaître de la scène scannée dès qu'ils sont dans l'angle mort (figure 2.a) du ou des troncs précédents. D'autre part, les houppiers entravent progressivement le signal au fur et à mesure qu'il monte dans les parties hautes des arbres. Cela entraîne une détection appauvrie des parties hautes de l'arbre, voir une absence totale de données dans le cas de feuillus denses (Durrieu, Allouis, Fournier, Véga, & Albrech, 2008; Béland et al., 2011).

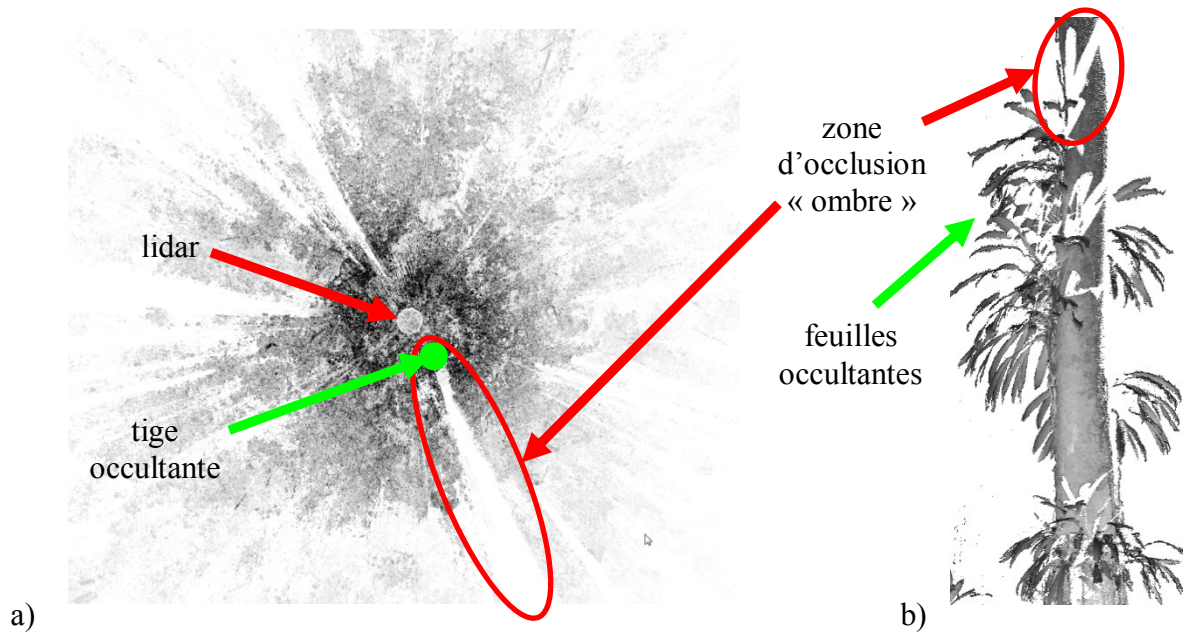


Figure 2 - Effet de l'occlusion sur le scan central d'une placette en forêt tropicale

Site expérimental de Corossolle, Guadeloupe, 2014. Scan central réalisé avec un lidar Z+F² imager 5006i

(a) vue de la placette du dessus (15 m x 15 m) qui montre l'occlusion radiale due aux tiges
(b) vue latérale d'une tige qui montre l'occlusion due aux feuilles.

C'est pourquoi le problème d'occlusion est le point de voute du déploiement de la technologie lidar à des fins d'inventaire forestier. Plus la forêt sera dense et peu structurée, et plus ce problème sera limitant voir paralysant. Dans les techniques d'inventaire évoquées précédemment, la moindre mesure d'attributs « simples » comme le dénombrement des tiges, le DHP ou la hauteur totale d'un arbre devient approximative voir aléatoire si les effets de l'occlusion ne sont pas correctement pris en compte ou corrigés. D'autre part, la mesure d'attributs plus complexes comme celle du volume de bois de tige, la surface totale des feuilles, l'indice de surface total (en anglais « plant area index » ou PAI) ou l'indice de surface des feuilles (en anglais « leaf area index » ou LAI) deviennent plus accessibles qu'à la main grâce à la nature de la donnée à condition là aussi de gérer le manque de donnée. En effet, la nature distribuée du nuage de point permet de faire des hypothèses sur les objets dans les zones occluses.

² <http://www.zofre.de>

Les milieux forestiers sont limitant par d'autres aspects que l'occlusion. Le vent par exemple, peut faire bouger la scène au moment de la scanner ce qui va altérer la qualité du nuage de point par rapport à la réalité du matériel forestier (figure 3). Il existe aussi des problèmes liés à la physique du capteur, notamment en ce qui concerne la différence entre la géométrie théorique et réelle du capteur, mais aussi la divergence des faisceaux. Par exemple, la figure 2.a montre que plus la distance avec scanner augmente et plus l'intensité des signaux retournés diminue. En effet, une plus faible quantité d'énergie par unité de surface des rayons sera retournée à cause de leur divergence à l'aller et de leur diffusion au retour. Cette divergence des faisceaux va aussi entraîner une détection plus grossière du milieu au fur et à mesure de l'éloignement à la source. À cette divergence du faisceau se rajoute des incertitudes liées au comportement de la longueur d'onde choisie, au mode de mesure de la distance, à la précision de l'horloge interne de l'appareil, à la gestion des échos, aux effets de bord sur les angles et arrêtes des objets scannés etc.

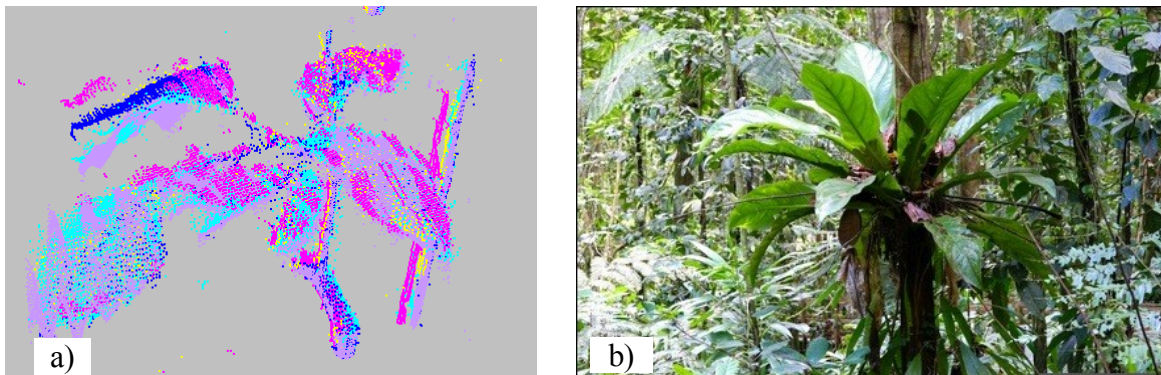


Figure 3 – Exemple de l'effet du vent sur des feuilles de 40 cm de long environ appartenant à un épiphyte de l'espèce *Anthurium hookeri* ou siguine rouge en français.

a) Cette capture en 2D d'un nuage de points en 3D provient d'un ensemble de scans lidar alignés. La couleur attribuée à chaque point permet de distinguer leur scan d'origine (ici 5 scans : violet, cyan, bleu, magenta et jaune). Le vent a pour effet de décaler la végétation d'un scan sur l'autre ou de former des ondulations virtuelles à la surface des feuilles d'arbre. Dans cet exemple, les points issus du scan violet ont subi une déformation causée par le vent alors que les points issus du scan cyan, bleu et magenta ont été acquis par vent faible. b) Cette photographie d'illustration donne l'aspect général de la siguine rouge en forêt humide.

4.1.3. Les stratégies d'acquisition multiscan

Une solution simple pour lutter contre l'occlusion est de scanner la cible ou la totalité d'une placette selon différents points de vue. Ceci est possible en cumulant des nuages de points obtenus à partir

de plusieurs positions de scan. Les méthodes d'acquisition avec scan multiples se déclinent en deux grandes catégories. Soit la placette forestière est acquise dans son ensemble, soit l'acquisition est ciblée sur objet en particulier comme un arbre par exemple. Dans les deux cas cela implique de déplacer le lidar successivement sur des points à travers la placette ou autour de la cible de manière à réduire au maximum l'occlusion dans la zone d'intérêt. Là encore, une multitude de variables sont à envisager en fonction du type de forêt, c'est-à-dire : du niveau de fermeture, du relief, du capteur et de la surface à couvrir. À cet égard, le choix du nombre de scans nécessaires est déterminant comme le sont aussi le patron de répartition et les angles d'ouverture de chacun. Ces paramètres doivent être choisis au plus juste, de manière à limiter le poids des données tout en assurant un sondage optimal du matériel forestier dans les zones d'intérêt. S'ajoute à cela l'utilisation indispensable de cibles ou de repères spatiaux (figure 4) adaptés aux environnements forestiers peu ou pas structurés. Sous forme de petites boules ou de cibles disposées à travers la scène forestière, le but est de fournir des points de référence fixe à tous les nuages de points.

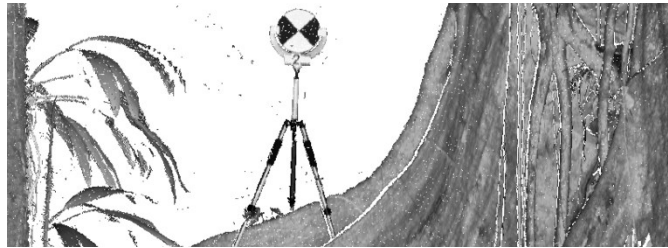


Figure 4 - Exemple de repère de type « cible réticule » placé dans une placette.

D'ailleurs la stratégie de positionnement des cibles et des scans lidar est l'opération la plus couteuse en temps au moment de l'acquisition sur le terrain, mais elle garantit l'exploitabilité de la donnée ainsi que la qualité des mesures. Dans le premier cas de numérisation d'une placette dans son ensemble, par exemple pour une surface circulaire de 11,28 m de rayon, un ensemble de cibles est positionné (par ex. six) afin qu'au moins trois cibles par position de scan soient visibles du capteur et que ces trois cibles soient aussi partagées avec au moins une autre position de scan (figure 5). Ce sont les conditions minimales pour garantir la reconstitution d'un nuage aligné à partir de plusieurs positions de scans. D'ailleurs, il faut s'assurer de bien faire pivoter chaque réticule sur son pied de façon à le positionner face à la ligne de tir du lidar tout en faisant attention à ne pas modifier sa position absolue du centre de la cible. C'est donc une opération délicate et obligatoire

à répéter pour chaque scan et qui peut être la cause d'une absence totale de reconstruction du nuage si elle est oubliée ou mal réalisée. Dans le second cas où un élément singulier de la placette est à numériser, les cibles sont positionnées tout autour de cet objet et au plus près des scans aux alentours sans pour autant les mettre dans la ligne de tir de manière à éviter de générer leur propre ombre sur l'objet d'étude.

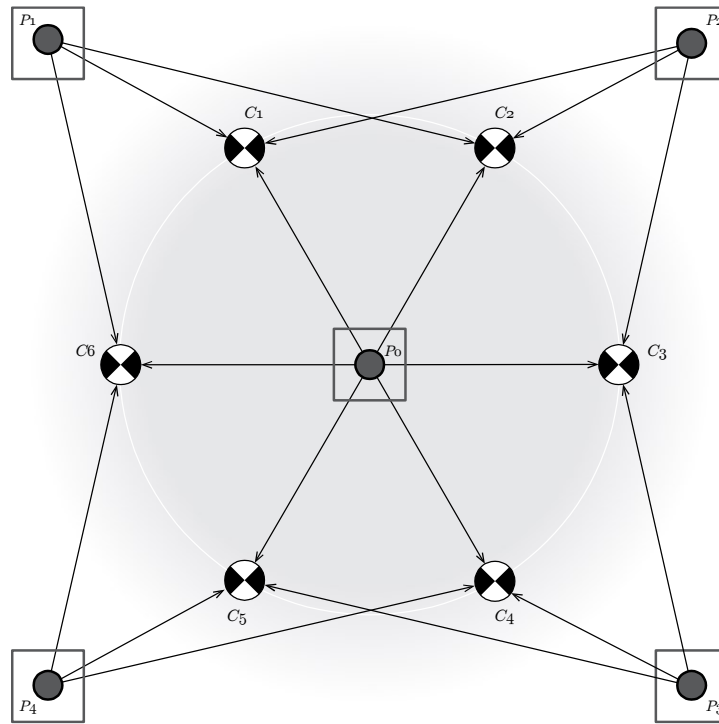


Figure 5 - Patron d'acquisition d'une placette forestière par un dispositif lidar terrestre

P_0 positionne le scan central au centre de la placette. Les 4 scans périphériques P_1, P_2, P_3 et P_4 sont placées aux 4 extrémités de la placette de manière à sonder l'espace de manière optimale. Les 6 cibles numérotées de C_1 à C_6 sont positionnées en cercle de manière à être vues à chaque fois par au moins 2 scans périphériques et le scan central.

En plus du positionnement approprié des scans et des cibles, chaque arbre de cette placette doit être visible depuis un maximum de position de scan. Ceci permet d'avoir accès à la densité réelle de tige de cette placette. Ensuite, si c'est possible, une vue la plus dégagée possible sur la partie supérieure des houppiers est recherchée pour chaque position de scan.

Un nuage de points constitué de plusieurs scans correctement alignés est visible sur la figure 6. En effet, les nuages de points forment des surfaces continues et fidèles aux aspérités de l'écorce. À

l'inverse, la figure 3 montre que le vent a décalé la surface d'une feuille entre les différents scans, ce qui en fait apparaître plusieurs à la place d'une seule. Cela peut aussi apparaître dans le cas d'un mauvais alignement entre les scans, à cause d'une mauvaise disposition des cibles ou du mouvement d'une cible au cours du processus de multi acquisition. De plus, les figures figure 7 et figure 8 montrent que l'assemblage de ces différents nuages de points ne permet pas de corriger l'irrégularité de la densité de points par unité de surface. Ce phénomène d'échantillonnage inégal de la végétation est causé par l'occlusion, la divergence des faisceaux lasers et la superposition de différents nuages de points.

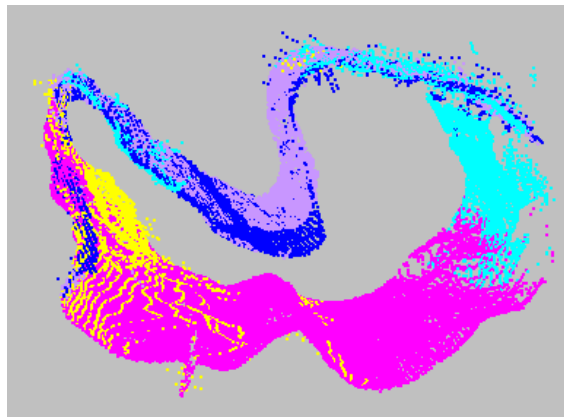


Figure 6 - Nuage de point de la section transversale d'un tronc d'arbre vue du dessus.

Le nuage de points est composé de 5 scans. La couleur attribuée à chaque point permet de distinguer leur scan d'origine (violet, cyan, bleu, magenta et jaune). La superposition des points acquis à la surface du tronc (écorce) par les différents couples de scans (jaune/magenta, bleu/violet, cyan/magenta) montre le bon alignement des différents nuages de points. Malgré la qualité de l'alignement de ces différents nuages de points, la densité totale de points par unité de surface de l'écorce reste irrégulière.

Les avantages pratiques de la technologie lidar-t sont d'obtenir des mesures égales ou plus précises, plus déterministes que les mesures prises manuellement par un technicien, sur certaines variables difficilement accessibles et de diminuer les interventions manuelles sur le terrain. D'ailleurs, le développement de méthodes qui utilisent le lidar-t n'implique aucune manipulation destructive, ce qui confère un atout conservatif et renouvelable non négligeable à ces inventaires par rapport aux mesures classiques. À l'avenir, si la mesure des attributs forestiers parvient à être automatisée, elle deviendra plus simple, plus rapide et moins coûteuse (Simonse, Aschoff, Spiecker, & Thies, 2003). Le lidar-t pourrait automatiser les mesures de l'inventaire forestier à l'échelle de l'arbre et de la placette (Thies et al., 2000; Aschoff & Spiecker, 2003; Shan & Toth, 2008). Le lidar-t a aussi

quelques faiblesses autour desquels les spécialistes des domaines de la télédétection et de la forêt essayent conjointement de trouver des solutions. Parmi les défis il y a la correction de l'occlusion, la compréhension des imperfections du capteur, la gestion de données lourdes et volumineuses, l'apprentissage et le développement de nouveaux algorithmes. Enfin, la technologie lidar-t n'est étudiée et déployée en forêt que depuis les années 2000. Or, presque quinze ans après, cette technologie a déjà connu bon nombre d'améliorations, notamment dans sa résolution spatiale et spectrale. Ces évolutions laissent présager des applications en forêt encore plus fines et efficaces dans le futur.

4.2. Le modèle L-Architect

Le modèle d'architecture L-Architect (« *Lidar data to tree Architecture* », Côté et al., 2012) reconstruit finement la structure d'arbres à partir de données lidar. À l'origine, ce modèle avait pour objectif d'apporter une solution au problème de l'occlusion. En effet, dans les forêts les plus denses, ce modèle permet de reconstruire la partie non visible de la végétation à partir des données visibles et numérisées par le lidar terrestre. Cette première utilisation est donc un bon moyen pour retrouver la surface foliaire totale des arbres ou estimer le volume de bois et la qualité de sa fibre. Cependant, cela n'est pas réalisable, du moins pour le moment, sans l'apport d'informations complémentaires à propos de chaque tige à reconstruire comme sa hauteur totale, son DHP, son espèce etc. C'est ensuite grâce à des relations allométriques qui relient ces paramètres et aux données lidar-t que les arbres peuvent être reconstruits (figure 7) en deux étapes en commençant par la croissance des branches pour finir par l'ajout du feuillage (figure 8). Par ailleurs, les paramètres requis par le modèle L-Architect sont typiquement fournis dans le cadre d'une placette d'inventaire. C'est pourquoi les placettes reconstruites par l'intermédiaire de ce modèle sont le plus souvent des reproductions de placettes d'inventaires (PEP) dès lors qu'elles ont pu être acquises au lidar-t.

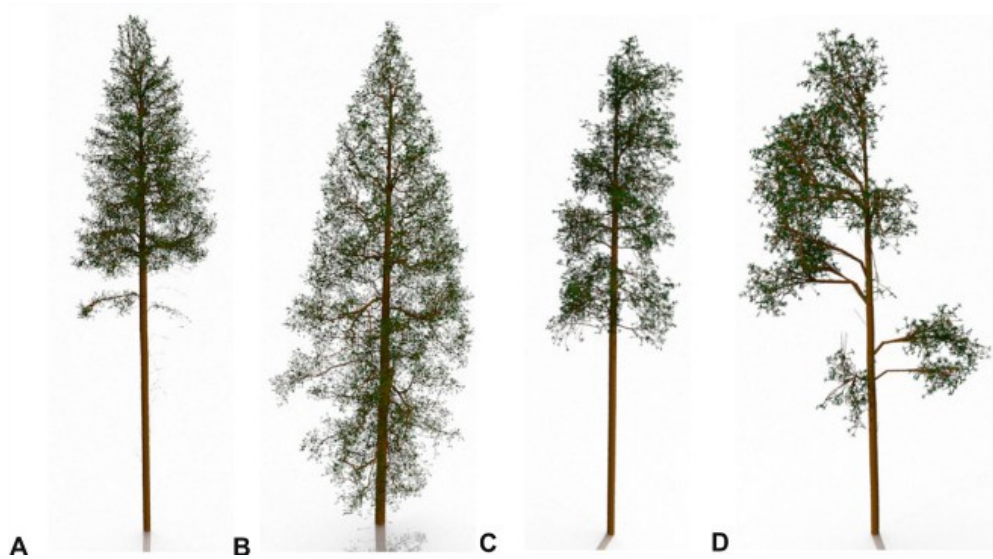


Figure 7 - Modèle d'arbres provenant des résultats de simulation de 4 espèces de conifères.

(A) *Pseudotsuga menziesii*, Sapin Douglas. (B) *Thuja plicata*, Cèdre Rouge de l'Ouest. (C, D) *Tsuga heterophylla*, Pruche de l'Ouest. Figure extraite de Côté et al., (2011)



Figure 8 - Représentation du feuillage (pousse) pour les quatre espèces de conifères.

(A) Pousse générique utilisée pour le Sapin Douglas, le Cèdre Rouge de l'Ouest et la Pruche de l'Ouest. (B) Épine de Pin d'Alep. Figure extraite de Côté et al., (2011)

Par ailleurs le modèle L-Architect fournit des maquettes numériques compatibles avec des programmes de lancer de rayons tels que PBRT (*Physically Based Ray Tracer*, Pharr & Humphreys, 2010) ce qui permet de simuler par tracé de rayons les données acquises par lidar-t. Enfin, il fournit aussi l'avantage de pouvoir recréer une forêt très réaliste dont chaque paramètre architectural est connu en absolu ce qui permet de réutiliser ces maquettes comme une base de données précise et exhaustive pour d'autres études sur la forêt. Dans ce projet, deux produits issus de L-Architect sont utilisés, comprenant : (1) un catalogue d'une centaine de spécimens reconstruits appartenant à deux espèces différentes (sapin baumier et épinette noire) et (2) les données géométriques complètes de ces arbres (surfaces et volumes des feuilles et du bois).

4.3. Définition des surfaces foliaires (ISF / DST)

4.3.1. Cas général pour les surfaces planes (feuillus)

L'Indice de Surface Foliaire (ISF), aussi connu sous son appellation anglaise de Leaf Area Index (LAI) est l'attribut structurel le plus courant pour exprimer la surface végétale totale (en m^2/m^2) dont un arbre dispose pour capter l'énergie lumineuse (Watson, 1947). Il s'agit de la somme des aires (en m^2) d'une des faces des matériaux chlorophylliens (feuilles) en vie par unité de surface au sol horizontal (en m^2). L'Indice de Surface Totale (IST) ou Plant Area Index en anglais (PAI), est similaire à l'ISF cependant il comptabilise toutes les surfaces de la plante et pas seulement les feuilles. La Densité de Surface Foliaire (DSF ou Leaf Area Density en anglais) et la Densité de Surface Totale (DST, Plant Area Density en anglais) sont respectivement les versions intégrées selon l'axe vertical, de l'ISF et de l'IST. Leur unité est donc exprimée en m^2/m^3 .

4.3.2. Cas particulier pour les surfaces non planaires (conifères)

L'ISF est un indice très important pour caractériser la couronne des arbres, cependant sa définition comporte des variantes assez fréquentes dans le cas des feuilles non planaires, recourbées, vrillées, et à fortiori dans les cas des aiguilles. Non seulement les aiguilles ne sont pas planes, mais elles prennent différentes formes pour chaque espèce de conifère. De plus l'architecture même d'une aiguille n'est pas assimilable à celle d'une feuille. Par contre, une pousse, c'est à dire un assemblage d'aiguilles (voir figure 8) peut être considérée comme une feuille. Chen et Black (1992) ont déterminé une approche adaptée pour des surfaces chlorophylliennes non planaires ainsi que des solutions pour comptabiliser les aiguilles des conifères. En effet, Chen et Black (1992) s'appuient sur la démonstration mathématique de Grace (1987) qui montre que l'aire totale d'une aiguille de pin éclairée par une source lumineuse est égale à π fois la surface de son ombre projetée « moyenne ». Ainsi, Chen et Black (1992) considérèrent que pour répondre à la définition de l'ISF il fallait diviser par $\frac{\pi}{2}$ la surface totale d'un objet non concave. Par la suite, Zheng et Moskal (2009) décrivent le « needle-to-shoot area ratio » qui en français veut dire le rapport entre la surface d'une aiguille et celle d'une pousse. L'indice de distribution du feuillage des conifères plus communément appelé indice de groupage Ω est un ratio (équation 2) dont le coefficient est destiné à corriger le calcul de l'ISF. Il s'obtient en divisant l'indice de groupage à l'échelle du peuplement

Ω_E par l'indice de groupage à l'échelle de la pousse γ_E . En outre, $\gamma_E = 1$ pour les feuillus. Zheng et Moskal (2009) ont aussi calculé que l'ISF des conifères pouvait être mal évalué en raison de la répartition non aléatoire des pousses. Dans le cas de sapins Douglas ce phénomène entraîne une sous-estimation de l'ISF d'environ 35 %.

$$\Omega(\theta) = \Omega_E(\theta)/\gamma_E \quad (2)$$

4.4. La mesure de l'ISF par télédétection

La mesure des surfaces foliaires définies dans le paragraphe 4.3 est une question récurrente et centrale en écologie forestière. Une des réponses majeures à ce problème est l'utilisation de modèles de transfert radiatifs appliqués à la forêt. En effet, ces modèles sont employés et développés depuis presque 40 ans car ils permettent de retrouver de manière relativement précise certaines métriques forestières grâce aux lois physiques qui régissent le comportement des ondes électromagnétiques avec la matière (diffusion, réflexion, transmission, absorption). Dans le cas de la forêt et de la canopée, c'est le comportement des rayons lumineux émis par le soleil (400 à 800 nm) qui est observé quand ces derniers passent à travers la végétation. Ainsi, tout un éventail de théories, de modèles physiques et d'appareils de mesure qui utilisent des modèles de transfert radiatif ou des algorithmes de lancer de rayons ont vu le jour pour déterminer des métriques qui concernent la plupart du temps la canopée, sa surface, sa densité, ses trouées, etc. Les bases de l'utilisation du transfert radiatif en forêt sont posées dans l'ouvrage de référence de Juhan Ross (Ross 1981) et ont été déclinés à de nombreuses reprises par des chercheurs du monde entier (Leblanc et al., 2005; Piboule, 2005; Durrieu et al., 2008; Zheng & Moskal, 2009; Béland, et al., 2014a). Ces modèles sont développés suivant plusieurs approches. En effet, il existe des solutions à une ou à trois dimensions, discrète avec l'utilisation de voxels ou géométriques. Les appareils de mesure les plus connus qui utilisent des modèles de transfert radiatifs sont par exemple, la sonde LAI-2000, la sonde TRAC, la photographie hémisphérique et plus récemment les systèmes lidar. Des modèles couramment employés dans les milieux de forêt sont par exemple ceux étudiés au sein d'un programme européen nommé RAMI (*Radiation transfert Model Intercomparison*). Les modèles comme DART (*Discrete Anisotropic Radiative Transfer*) (Grau et al., 2017), Raytran et PBRT peuvent être utilisés pour des simulations d'observations lidar. L'intérêt de ces modèles est

de pouvoir simuler des comportements physiques en s'affranchissant des contraintes du terrain mais aussi d'établir des preuves mathématiques à des théories complexes et à terme d'améliorer et d'automatiser des mesures relativement complexes.

4.4.1. Introduction de la loi de Beer-Lambert et application à la forêt

Les sciences forestières réutilisent souvent les bases d'un concept découvert et mis au point à l'origine en chimie pour décrire le comportement de la lumière dans un milieu translucide et homogène. Ce concept, plus communément connu sous le nom de « loi de Beer-Lambert » porte le patronyme de deux de ses auteurs sans mentionner M. Pierre Bouguer, qui fut son premier créateur. Cette loi mise au point au 18^{ième} et 19^{ième} siècle fait le lien entre la concentration d'un élément chimique dans une solution aqueuse et l'atténuation lumineuse causée sur un rayon incident d'intensité I_0 de longueur d'onde λ dans une cuvette de largeur l (figure 9).

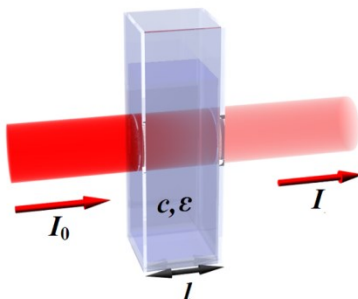


Figure 9 - Absorption lumineuse dans une cuvette de liquide turbide (loi de Beer-Lambert).

La cuvette est représentée par le contenant rectangulaire de couleur bleue au centre du schéma. Elle contient une solution aqueuse pigmentée homogène avec une concentration notée c et une absorptivité molaire ε (L.mol⁻¹.cm⁻¹) pour une longueur d'onde donnée. Le rayon lumineux de longueur d'onde λ , représenté par un cylindre rouge sur le schéma, traverse la solution aqueuse sur une distance correspondant à la largeur de la cuvette l avec une intensité incidente I_0 et en ressort avec une intensité transmise I_1 .

Ce phénomène s'explique par une relation de **proportionnalité** entre l'**absorbance** A_λ d'une solution turbide et sa **concentration** c en élément pigmenté. La relation est alors :

$$A_\lambda(l) = \varepsilon \cdot c \cdot l = -\log_{10} \left(\frac{I_1}{I_0} \right) \quad (3)$$

où A_λ est l'absorbance de la cuvette pour une longueur d'onde λ (sans unité) ; ε est l'absorbivité molaire de l'élément pigmenté pour une longueur d'onde λ ($\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) et $\frac{I_1}{I_0}$ est la transmittance de la cuvette (sans unité). Autrement dit, en ce qui concerne la **transmittance**, l'intensité lumineuse en sortie est :

$$I_1 = e^{-\varepsilon.c.l.\ln(10)}.I_0 \quad (4)$$

L'intérêt avec les modèles de transfert radiatif ou les algorithmes de lancer de rayons énoncés précédemment est de pouvoir retrouver la concentration de la végétation ou plutôt la proportion de trouée ou d'opacité de la canopée en calculant le bilan radiatif entre la lumière incidente (I_0) et la lumière transmise (I_1) et diffusée à travers la canopée. Pour simplifier, dans la cas d'un système de télédétection passif, (I_0) sont les rayons émis par le soleil et (I_1) sont les rayons captés par l'appareil de mesure. Dans cet exemple, l'absorbivité des feuilles à la longueur d'onde étudiée et la distance parcourue par rayons à travers la canopée permettent de calculer la concentration des feuilles et donc la surface foliaire avec des indices comme l'ISF ou l'IST. Dans le cas d'un système actif comme le lidar, les rayons incidents sont émis par l'appareil de mesure lui-même ce qui permet de mieux les maîtriser, puis ils se réfléchissent à la surface de la végétation avant d'être captés.

La loi de Beer-Lambert n'est applicable que dans certaines conditions. Le milieu turbide, dans le cas de l'espace rempli par la canopée, doit être suffisamment homogène par rapport à la taille et la densité des rayons. À cet égard, les éléments (végétation) qui remplissent cet espace doivent pouvoir être considérés que comme un mélange gazeux par rapport à la résolution spatiale de l'échantillonnage.

La probabilité [$P(\theta)$] qu'un rayon avec un angle d'incidence θ passe à travers une canopée uniforme et horizontale (figure 10) est donnée par une loi de Poisson (Ross, 1981; J M Chen & Black, 1992) telle que :

$$P(\theta) = \exp\left[-\frac{G(\theta).\Omega(\theta).L}{\cos(\theta)}\right] \quad (5)$$

- $G(\theta)$: est le coefficient d'extinction, il représente la distribution angulaire de toutes les composantes du couvert forestier. Cette distribution tend vers 6 distributions standards : planophile, érectophile, plagiophile, extremophile, uniforme ou sphérique détaillées en annexe (figure 28A4).
- $\Omega(\theta)$: est l'indice de groupage. Il sert à caractériser la distribution du feuillage.

- ↳ Si $\Omega(\theta) < 1$: le feuillage groupé (aggloméré par zones).
- ↳ Si $\Omega(\theta) = 1$: le feuillage est aléatoire (cas idéal pour la loi de Beer-Lambert)
- ↳ Si $\Omega(\theta) > 1$: le feuillage est ordonné selon un patron régulier
- L : est l'ISF, soit l'air d'une des faces des feuilles par unité de surface au sol (m^2/m^2).

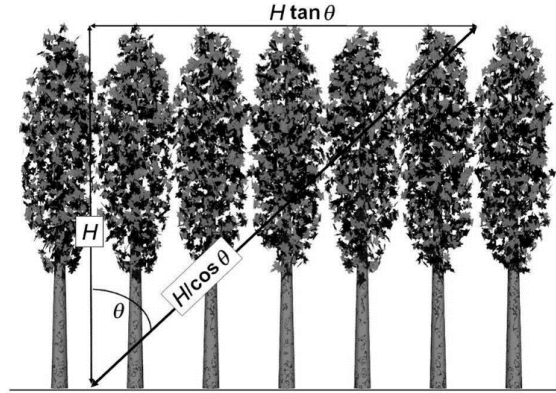


Figure 10 - Illustration de la géométrie utilisée pour le calcul de l'ISF en forêt à partir d'instruments optiques (figure extraite de Leblanc 2014).

H est la hauteur (en mètres) entre l'appareil de mesure et la cime des arbres et θ est l'angle d'incidence des rayons lumineux émis par le soleil. $\frac{H}{\cos \theta}$ est la distance parcourue par le rayon lumineux à travers la canopée avant d'atteindre le capteur photosensible.

Dans cette étude le calcul de l'IST a été transposé à l'échelle du voxel comme présenté ci-dessous (partie 4.6). En effet, le cas le plus courant de l'utilisation de la loi de Beer Lambert en forêt suggère l'utilisation d'un capteur passif qui reçoit les rayons du soleil transmis à travers la canopée (figure 10). Par opposition, dans cette étude, les rayons transmis détectés après réflexion par la cellule photosensible proviennent d'une source lumineuse monochromatique située au même endroit que cette dernière, c'est-à-dire sous la canopée. L'autre différence importante par rapport à l'emploi d'un instrument passif est que L-Vox réalise l'estimation de la densité de la végétation de manière ultra locale à l'échelle du voxel puis il répète l'opération sur l'ensemble des voxels de la scène.

4.5. L'algorithme de lancer de rayons (PBRT)

Pour les besoins de la simulation, deux types de rendu de scène en 3D sont nécessaires de manière à fournir des intrants au processus méthodologique. Le premier rendu implique de simuler des scans lidar à l'intérieur d'une maquette forestière finement modélisée par L-Architect. Le second

doit générer un aperçu graphique réaliste de ces mêmes maquettes virtuelles. Dans le premier cas, il est requis de pouvoir simuler une source de lumière et un capteur tous deux hémisphériques et situés à la même coordonnée spatiale. La source émet des faisceaux laser avec une longueur d'onde et une géométrie similaire à celle d'un lidar Z+F^{®3} et le récepteur enregistre les coordonnées des faisceaux qui ont rencontrés un obstacle. Dans la seconde utilisation, il s'agit d'une part de générer une source de lumière diffuse pour éclairer la scène forestière et d'autre part de capturer la scène à travers un dispositif optique similaire à celui d'un appareil photographique numérique bien différent d'un capteur lidar. C'est à ces fins que le logiciel *Physically Based Ray Tracer* (PBRT) a été employé dans ce projet. Ce logiciel utilise un système de tracé de rayons qui suit à la fois les lois optiques et physiques de la lumière. De plus, il fournit un cadre de développement infographique pour générer des scènes virtuelles en 3D réalistes.

4.5.1. Simulation d'un scan lidar

Dans le premier cas d'utilisation, il est nécessaire de créer un scanner lidar terrestre car ce type de capteur n'existe pas dans la bibliothèque d'objets fournis par PBRT. Ce scanner se décompose en deux parties, avec d'une part, une source de rayonnement et d'autre part un capteur de faisceaux lumineux. La source, représentée par un point rouge au centre de la sphère (figure 11) est ponctuelle et partage la même coordonnée spatiale que le capteur. En ce qui concerne le capteur, il s'agit d'une caméra de type environnement de PBRT. La surface sphérique de ce type de capteur est découpée en n pixels horizontaux et m pixels verticaux. Ceci a pour conséquence de créer des rayons lidar « cubique », en lieu et place des faisceaux lidar d'un scanner réel une empreinte surfacique rectangulaire de type pixel (surface rouge sur la figure 11). De son côté, l'échantillonneur commence par établir la meilleure grille de discrétisation du signal en fonction du type de projection et de la résolution de la caméra utilisée. Dans le cadre de cette étude, l'échantillonneur a pour rôle de déterminer le nombre d'échantillons optimal par pixel sur une surface sphérique en fonction des pixels voisins. Ensuite, les rayons (sans épaisseur) sont successivement lancés à partir de la source vers chaque échantillon précédemment établi. Pour chaque échantillon, ces rayons sont intégrés en surface et en volume en fonction des objets rencontrés dans le pixel. Cette intégration donne une valeur d'intensité qui est jointe à la coordonnée par exemple du premier retour (XYZ)

³ Lidar terrestre Imager 5006i de la compagnie Zoller+Fröhlich : <http://www.zofre.de>

des faisceaux retournés par les échantillons de ce pixel. Ces valeurs sont ensuite écrites dans un fichier ASCII selon un format standard de coordonnées spatiales et l'opération se poursuit jusqu'à épuisement des échantillons de la sphère.

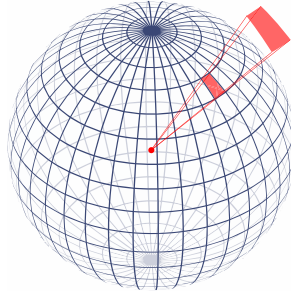


Figure 11- Surface sphérique d'une caméra de type environnement utilisée pour simuler le lidar-t.

L'ensemble composé de la source lumineuse, point rouge au centre de la sphère, et d'une surface d'échantillonnage, carré rouge à la surface de la sphère constitue un rayon lidar. La dimension de la grille sphérique détermine la résolution angulaire du capteur lidar.

4.5.2. Rendu graphique d'une maquette forestière

Dans le second cas d'utilisation, il s'agit de produire des rendus graphiques des modèles de forêt issus de L-Architect pour aider l'observateur humain à visualiser des environnements virtuels. Autrement dit, ceci revient à simuler des photographies de ces maquettes forestières. Pour cela, la technique classique (figure 12) consiste à utiliser un ensemble d'objets comme : un capteur capable d'imiter l'objectif d'un appareil photo, une source de lumière diffuse pour simuler l'éclairage produit par le soleil, une grille de pixels plane qui va échantillonner la lumière reçue et la scène de forêt simulée. Par cette technique il est possible de produire de véritables photographies numériques des maquettes utilisées au cours de cette étude (voir figure A1 en annexe).

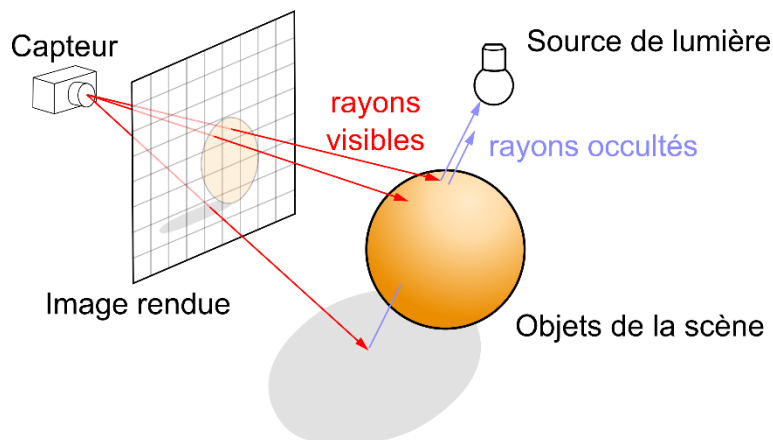


Figure 12 - Schéma de principe d'un rendu graphique de type photographique avec PBRT.

4.6. La voxélisation

4.6.1. Calcul de l'indice de densité relative (IDR)

Le voxel est un pixel en trois dimensions (3D), c'est-à-dire un cube qui contient une ou plusieurs valeurs (Hosoi & Omasa 2006). L'ensemble des voxels forme une grille 3D dans laquelle chacun a une coordonnée (X, Y, Z) dans un repère cartésien (Côté et al., 2011; Béland et al., 2011). L'indice de densité relative (IDR) pour chaque voxel est le quotient du nombre de rayons retournés dans un cube sur le nombre de rayons qui passent à travers ce cube (Durrieu et al., 2008). Pour évaluer cet indice dans chaque cube, la grille de voxels doit être parcourue à quatre reprises pour chaque position de scan. Une première fois pour compter le nombre de points retournés à l'intérieur du voxel (figure 13.a). Une deuxième fois pour calculer le nombre de rayons théoriques maximum qui pourrait passer dans chaque voxel (figure 13.b). Une troisième fois pour comptabiliser les rayons précédemment interceptés sur le chemin entre le voxel et le scanner (figure 13.c). Enfin, une dernière fois pour calculer l'IDR qui utilise les trois précédents paramètres (figure 13.d).

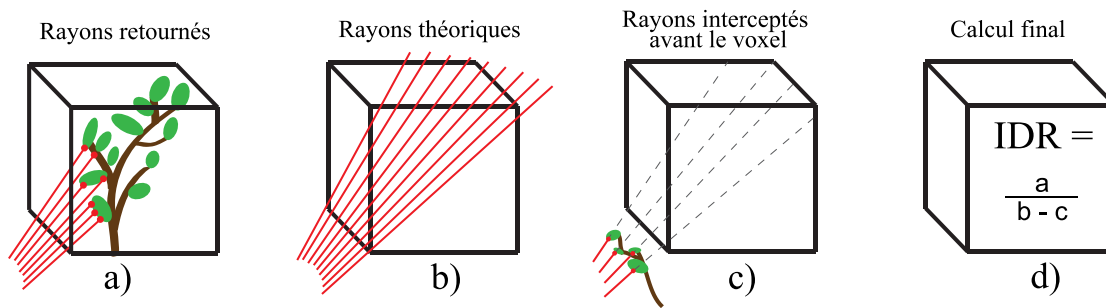


Figure 13 - Schéma du calcul L-Vox pour déterminer l'indice de densité relative (IDR) de matériel dans un voxel (tiré de Durrieu et al. 2007).

4.6.2. Calcul de la DST par voxel

Dans cette étude, la loi de Beer-Lambert détaillée dans la partie 4.4.1 est appliquée mais à l'échelle du voxel (figure 14) pour en déduire la DST par voxel. La dimension de ce dernier est choisie par rapport à l'envergure moyenne des feuilles de manière à considérer l'indice de groupage $\Omega(\theta)=1$, c'est-à-dire avec un feuillage réparti de manière aléatoire à l'intérieur du voxel. De plus, la distribution angulaire du feuillage à l'intérieur du voxel est considérée comme une orientation

sphérique (tableau A1), c'est-à-dire avec angle de visée zénithale moyen $\overline{\theta}_1 = 57.3^\circ$ ce qui implique $G(\theta) = 0,5$. D'autre part, dans le cas de voxels cubiques de dimension Δh , le calcul de probabilité de trouée prend en compte la surface projetée du voxel A_{proj} dans un plan perpendiculaire à la direction des rayons par rapport au volume du voxel V_{vol} ($V_{vol} = \Delta h^3$). Cette surface projetée et perpendiculaire aux rayons incidents permet de déduire la distance de parcours des rayons à l'intérieur du voxel d_v (en bleu sur la figure 14) avec le rapport : $d_v = \frac{V_{vol}}{A_{proj}} = \frac{\Delta h^3}{A_{proj}}$ (Béland et al. 2014a) ou $d_v(\theta) \approx \frac{\Delta h}{\cos(\theta)}$.

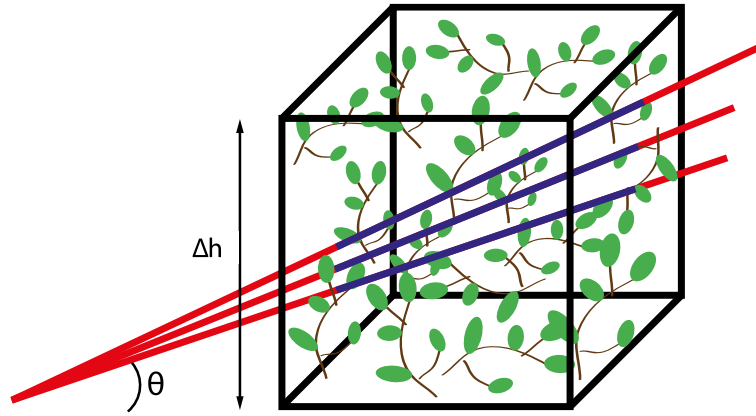


Figure 14 - Schéma d'application de la loi de Beer-Lambert à l'échelle du voxel.

De plus, en l'absence de distinction entre le bois et le feuillage, l'équation de l'ISF est généralisée en IST. Sachant que pour un voxel cubique $IST = DST_v \times \Delta h$, inverser cette équation permet de retrouver le DST_v pour un voxel (Béland et al. 2014a; Piboule 2005) :

$$P(\theta) = \exp \left[\frac{-G(\theta) \cdot \Omega(\theta) \cdot (DST_v \cdot \Delta h)}{\cos(\theta)} \right] \quad (6)$$

$$P = \exp(-0,5 \cdot DST_v \cdot d_v) \quad (7)$$

$$DST_v = -\frac{\log(P)}{d_v \times 0,5} \quad (8)$$

Pour finir, l'inverse de la loi de probabilité P qu'un rayon passe à travers un voxel, revient à calculer la probabilité qu'il soit intercepté, soit $1 - P$. L'algorithme L-Vox décrit dans la partie 4.6.1 procure un IDR qui correspond à la proportion normalisée de rayons interceptés dans un voxel. C'est pourquoi la relation $IDR = 1 - P$ peut être appliquée, ce qui donne :

$$DST_v = -\frac{\log(1-IDR)}{d_v \times 0.5} \quad (9)$$

4.6.3. Effet de l'occlusion

Le calcul des voxels pour chaque point de vue (scan lidar-t) énoncé en 4.6.1 a pour inconvénient de ne pas donner un indice de densité directement corrigé. En effet, il y a encore des imprécisions à cette étape du calcul (Durrieu et al., 2008). Le principe d'occlusion apparaît au fur et à mesure de l'éloignement à la source laser. Plus la distance augmente et plus il est probable que chaque faisceau ait rencontré sur sa trajectoire au moins un élément de la végétation (milieu homogène) (Durrieu et al., 2008). Dès lors, le nombre de rayons interceptés sur l'ensemble des voxels déjà parcourus augmente. Par conséquent, le nombre de rayons restant pour détecter la végétation diminue si bien que la quantité de rayons retournés diminue indépendamment de la densité réelle du matériel présent (Van der Zande et al., 2006). L'impact de l'occlusion sur le calcul de l'IDR est illustré par la figure 15 à travers 3 cas représentatifs : absence d'occlusion, occlusion partielle et occlusion totale.

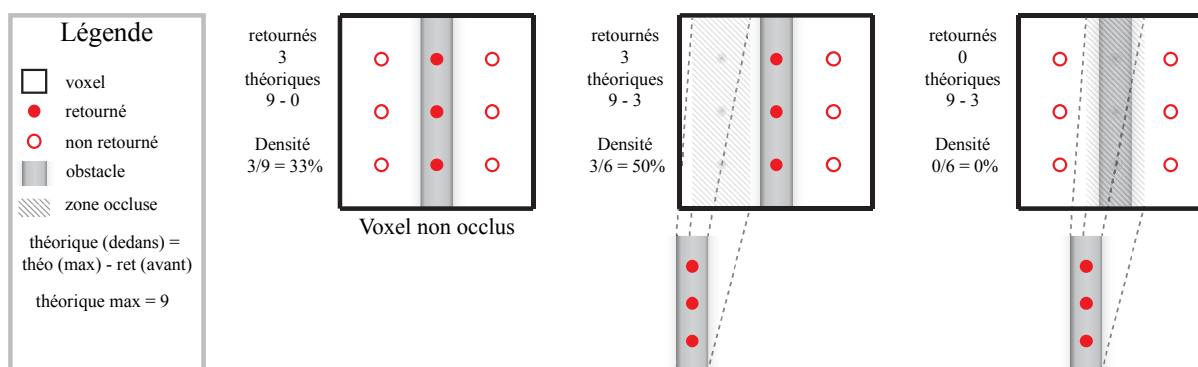


Figure 15 - Schéma sur l'effet de l'occlusion (tiré de Durrieu et al. 2008).

Les trois encadrés noirs symbolisent trois voxels vus en coupe qui décrivent trois cas représentatifs des effets de l'occlusion. Le voxel de gauche représente le cas sans occlusion dans lequel une tige verticale (en gris clair au milieu de l'encadré) retourne 3 faisceaux lidar sur les 9 émis par le capteur. Le voxel central montre la même tige qui retourne aussi les trois mêmes rayons lidar mais seulement 6 rayons ont atteint le voxel, car 3 des 9 rayons émis ont été interceptés avant d'atteindre ce voxel. C'est le cas de l'occlusion partielle du voxel. Pour finir, le voxel de droite ne retourne aucun faisceau bien qu'il contienne la même tige que les deux premiers voxels et qu'il y ait eu les mêmes 9 faisceaux d'émission. C'est le cas de l'occlusion totale.

4.6.4. Combinaison des points de vue

La solution pour diminuer significativement ce problème d'occlusion s'appuie sur le choix stratégique de la position des scans dans la placette. Une fois le problème d'échantillonnage inégal résolu (étape précédente), ces balayages multiples deviennent précieux pour lutter contre l'occlusion. Chaque scan a permis de calculer une grille de voxels. Pour générer une seule grille finale il faut donc sélectionner, pour chaque voxel, la valeur de densité la plus juste entre toutes les grilles concurrentes. Par ailleurs, chaque voxel contient trois paramètres liés à la proportion d'interception des rayons (figure 13). Il est donc possible de sélectionner les meilleures valeurs de densité en combinant ces paramètres de manière à créer un indicateur d'occlusion. Plusieurs théories s'affrontent entre les méthodes de sélection. La plus courante consiste à prendre la valeur de densité maximale en gardant un seuil minimum des rayons restants. Une seconde prend la valeur de densité du voxel si son nombre de rayons restants est le plus élevé, c'est-à-dire si sa quantité de rayons précédemment interceptés est minimum.

5. Méthodologie

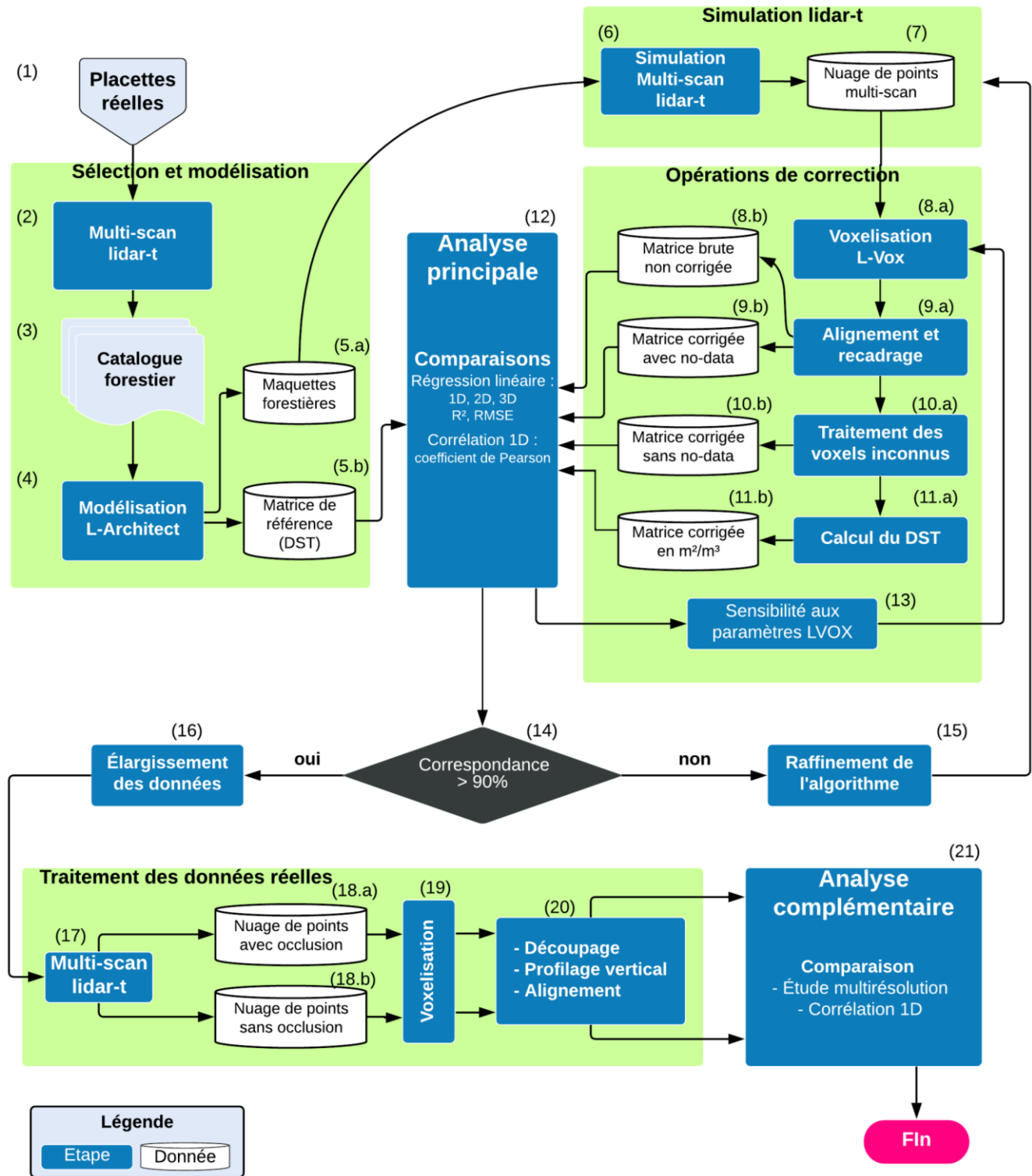


Figure 16 - Diagramme méthodologique général de l'étude.

Le processus méthodologie comporte deux grandes parties qui se distinguent l'une de l'autre par la nature des données utilisées. La première partie, décrite dans la moitié supérieure du diagramme (figure 16, étapes de 1 à 13), utilise uniquement des données issues de simulations, la seconde, située dans la partie inférieure du diagramme (figure 16, étapes de 17 à 21) utilise exclusivement de données acquises en forêt. La première grande partie s'organise autour d'une boîte centrale intitulée « Analyse principale » (figure 16, étape [12]) qui fait appel à trois organes de fonctionnement représentés par des encadrés verts. Le premier encadré vert « Sélection et de modélisation » fournit les données de référence, le second « Simulation lidar-t » produit les nuages de points simulés et le troisième « Opérations de correction » regroupe toutes les étapes de correction. La seconde grande partie fait suite à un processus de prise de décision et de rétroaction (figure 16, étape [16]). Elle consiste à réaliser une analyse complémentaire avec un nouveau jeu de données entièrement réel tout en conservant une méthodologie analogue à la première partie.

5.1. Validation principale : données simulées

5.1.1. Sélection et modélisation des peuplements

Étape [1 à 3] : Sélection des placettes. La toute première étape de ce travail consiste à sélectionner un gradient pertinent de placettes d'inventaire pour appuyer la production de maquettes. La diversité des placettes réelles ainsi retenues est déterminante, car elle constitue la matière première à l'ensemble de l'étude. Toutefois, il y a deux restrictions au choix de ces placettes. Il faut d'une part, qu'elles soient acquises par des scans lidar-t (*Étape 2*) et d'autre part qu'elles soient composées d'espèces modélisables par L-Architect, c'est-à-dire des conifères.

Étapes [4, 5] : Modélisation L-Architect. Concrètement, le modèle L-Architect génère une maquette virtuelle sous deux formats. Il y a la forme géométrique (figure 16.5a) dans laquelle chaque élément de la végétation est exprimé par une forme vectorielle en 3D (voir rendus figure 7 et figure 8) et la forme matricielle (figure 16.5b) où chaque voxel donne une valeur numérique de la surface et du volume combiné du bois et des feuilles (par ex. figure 14). Dans le processus méthodologique (figure 16) ces deux formats sont utilisés. La maquette au format géométrique alimente la simulation de balayages lidar-t (figure 16.6) décrite dans le paragraphe suivant et les données matricielles constituent les données de référence. Par ailleurs, la grille L-Architect est calculée à une résolution de 5 cm de manière à pouvoir servir de référence à toute grille L-Vox avec une résolution multiple de 5 cm comme 10 cm, 15 cm ou 20 cm.

5.1.2. Simulation lidar-t

Étapes [6, 7] : Simulation de scan lidar-t. Le simulateur comptabilise les premiers retours de tous les rayons lancés selon les spécifications d'angles d'ouvertures et de résolution typiquement configurables par des scanners lidar-t employés en forêt (par ex. FARO^{®4} ou Z+F[®]). La simulation de scan lidar-t est basée sur l'algorithme de tracé de rayons PBRT et se distingue d'un scan réel réalisé *in situ* par au moins deux aspects. Le premier est qu'il ne prend pas en compte certains effets parasites comme le vent, le soleil, la pluie, l'humidité et les imperfections liés au capteur comme le bruit et les retours aberrants. Par contre, le comportement du signal en lui-même est relativement réaliste, car le grossissement de l'empreinte laser est simulé en fonction de la distance ainsi que la divergence des rayons les uns par rapport aux autres. Le deuxième point est que le sol n'est pas simulé dans la maquette forestière L-Architect. De ce fait, aucun rayon ne se réfléchit à la surface du sol et aucune extraction de celui-ci n'est nécessaire en pré-traitement. Bien que cette simulation ne prenne pas en compte certains effets indésirables, ceci n'affecte pas notre méthode de validation. En effet, notre objectif est de reproduire l'occlusion et l'échantillonnage inégal des scans réels pour comprendre le comportement de L-Vox face à ces effets. Toute autre perturbation comme le vent ou des points aberrants ne feraient que rendre cette validation plus complexe en augmentant le nombre de variables ou contraintes liées à la prise de données lidar-t en forêt.

Un canevas de cinq scans est appliqué avec un scan au centre et quatre scans sur les bords opposés de la placette circulaire (figure 17). Ce dispositif est adopté de manière à maximiser la détection des surfaces végétales tout en restant dans un cadre réaliste et reproductible sur le terrain. Cet agencement est plus performant qu'un seul scan central pour contrer les effets d'occlusion. Son principal défaut est qu'il surestime significativement certaines surfaces tout en laissant certaines autres non détectées à cause de l'occlusion restante notamment dans les étages supérieurs des houppiers.

⁴ <http://www.faro.com>

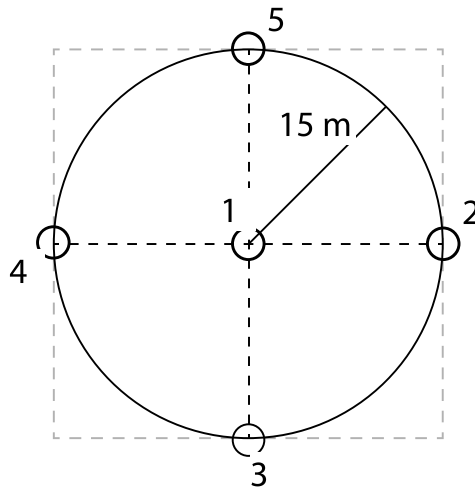


Figure 17 - Canevas de positionnement des 5 scans lidar-t.

5.1.3. Opérations de correction

Étape [8.a] : Voxélisation L-Vox. L'algorithme L-Vox produit deux grilles 3D, la première (8.b) contient les données non corrigées, c'est-à-dire le nombre de rayons retournés par voxel et la deuxième (9.b) donne l'indice de densité relatif (IDR) du matériel végétal (figure 13). Ces deux grilles ne sont pas exploitables pour l'analyse directement à leur sortie de L-Vox, en effet, elles doivent d'abord passer par l'étape d'alignement et recadrage détaillée plus bas. Par ailleurs, l'algorithme L-Vox calcule un indice de densité relatif (grille 9.b) uniquement pour les voxels sondés par suffisamment de faisceaux lidar. C'est-à-dire que tous les voxels de la grille 9.b qui n'ont pas pu être traités par l'algorithme L-Vox à cause d'un manque de rayons entrants (noté $n_e = (b - c)$, voir figure 13) sont catégorisés comme voxels « inconnus ». Dans cette étude, le seuil minimum de rayons entrants a été fixé à 10. Ceci est un postulat formulé pour limiter l'erreur d'estimation de la densité de végétation (Durrieu et al., 2008).

Étape [9 a.] : Alignement et recadrage. Les matrices de référence issues de L-Architect et celles issues de la voxélisation par L-Vox ne sont pas directement comparables. Premièrement, elles ne contiennent pas exactement la même information (IDR vs DST). Deuxièmement, il est nécessaire de les réaligner dans le même référentiel pour que chaque voxel échantillonne la même unité de volume aux mêmes coordonnées. De surcroît, il faut calculer la plus petite boîte englobante des deux grilles et appliquer la plus grande d'entre elles de manière à travailler sur des grilles de mêmes dimensions sans perdre d'information.

Étape [10 a.] : Interpolation des voxels de valeur inconnue. Cette étape permet de déterminer la valeur des voxels qui n'ont pas pu être traités par L-Vox à cause d'une trop forte occlusion (cf. *Étape [9 a.]*). Plusieurs méthodes basées sur l'utilisation des voxels voisins connus (figure 18, en **bleu**) sont envisageables pour déterminer ces voxels de valeur inconnue (figure 18, en **rouge**), en utilisant leur valeur moyenne par exemple. Toutefois, une nouvelle information est indispensable pour savoir si ces voxels de valeur inconnue sont susceptibles de contenir de la végétation (plein) ou non (vide). Cette nouvelle information est apportée par une autre grille appelée « grille binaire » (figure 18, ligne du milieu). C'est en fait une variante de la grille 8.b (figure 16) qui attribue à chaque voxel la valeur « vraie » c'est-à-dire « 1 » en langage binaire, s'il contient au moins un retour ou « faux », c'est-à-dire « 0 », s'il n'en contient aucun. Malgré le fait que cette information est insuffisante pour déterminer la densité de matériel contenue dans les voxels de valeur inconnue, elle permet néanmoins de retirer tous les voxels vides (aucun retour) avec une bonne fiabilité.

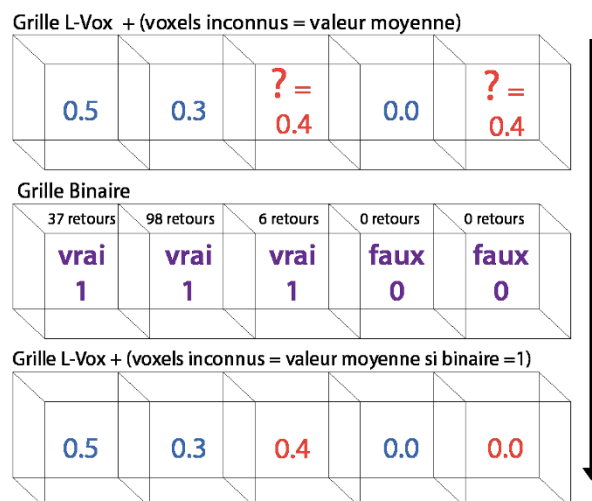


Figure 18 - Techniques de remplissage des voxels de valeur inconnue (voxel non suffisamment sondé) avec l'aide de la grille binaire.

Étape [11 a.] : Conversion en DST des matrices corrigées. Bien qu'il soit possible de calculer des similitudes statistiques entre des matrices d>IDR et de DST aux différentes étapes du processus de correction en raison du lien de proportionnalité qui les lie, il reste néanmoins indispensable de pouvoir récupérer une valeur de DST exploitable à la fin du processus. Le calcul de conversion se fait par l'intermédiaire de l'équation (8) inspirée de la loi de Beer-Lambert.

La matrice ainsi calculée (figure 16, 11.b) est la matrice finale pour laquelle le but est obtenir les meilleurs résultats de correspondance avec la matrice de référence (figure 16, 5.b) car elles sont toutes les deux exprimées dans les mêmes unités.

5.2. Analyse principale

5.2.1. Analyse des similitudes statistiques : *étape [12]*

Parmi les outils d'analyse possibles, le profil vertical est un moyen très utilisé pour exploiter ces données (Hosoi & Omasa, 2006; Côté et al., 2012; Béland et al, 2014a). C'est un moyen simple (une seule dimension spatiale) et concret, car il est directement lié à la répartition de la végétation sur la hauteur du couvert. L'autre technique consiste à projeter ces mêmes grilles, mais dans un plan en 2D (figure A3). Ces projections livrent un indice de densité par unité de surface (IST) et elles donnent une meilleure idée de la distribution des valeurs dans l'espace, notamment pour la projection horizontale (plan XY). Les profils verticaux sont par la suite utilisés pour produire des régressions linéaires et paramétriques (de type gaussien, polynomial ou Weibull) complétées par des mesures statistiques classiques (moyenne, écart-type) de manière à comparer deux profils entre eux sur des bases communes. Les régressions linéaires sont systématiquement réalisées sur des graphes de dispersion entre les valeurs des voxels mesurées et les données de référence, que ce soit en 3D (voxel par voxel), en 2D (projection) ou en 1D (profil vertical).

5.2.2. Études de sensibilité : *étape [13]*

L'indice de densité relative (IDR) donné par L-Vox dépend au moins de quatre facteurs influents. D'une part, il y a la pente de la placette forestière et la résolution angulaire des scans lidar qui sont deux paramètres liés respectivement à la modélisation L-Architect et au simulateur de lidar terrestre. D'autre part, la résolution de la grille de voxels et la méthode d'assignation des valeurs pour les voxels occlus (non suffisamment sondés par aucun des scans) sont deux aspects inhérents à l'algorithme L-Vox. Une attention particulière est portée à isoler correctement le comportement de chacun des quatre facteurs pour éviter qu'ils interfèrent les uns avec les autres. Par conséquent, ils doivent être analysés séparément. De plus, leur analyse ne concerne que certaines placettes.

5.3. Décisions

Cette partie est schématisée pour inscrire la stratégie et les objectifs de notre projet de recherche à l'intérieur du processus méthodologique. Un taux de similarité supérieur à 90 % (*Étape [14]*) pour les profils verticaux permet de considérer que l'ensemble du processus de correction est satisfaisant dans le cadre de l'analyse principale. De plus, un gradient de quatre placettes simulées est considéré comme suffisamment représentatif pour mener à bien à ces résultats à l'intérieur de l'analyse principale. Toutefois, il reste deux cas de figures potentiellement incertains qui requièrent de prévoir un travail complémentaire pour conclure à l'issue à cette prise de décision. En effet, soit les seuils de similitude attendus sont atteints mais les imperfections du modèle de simulation lidar sont remis en cause, soit la technique d'estimation des voxels inconnus est insatisfaisante. Dans le premier cas (*Étape [16]*), il faut définir un gradient de placettes réelles et utiliser une technique d'étalonnage basée sur un élagage approprié des placettes afin d'éviter certaines approximations théoriques. Dans le second cas (*Étape [15]*), il faut évaluer et améliorer les performances de la méthode d'estimation des voxels inconnus à l'étape [10.a]. La méthode de recouvrement des voxels inconnus comprend plusieurs niveaux de performance. Elle part de la technique la plus simple jusqu'à l'application d'algorithmes de rééchantillonnage et de reconstruction les plus complexes. Le but est de satisfaire au minimum de correspondance de 90 % énoncé à l'étape [14]. C'est pourquoi, il est nécessaire d'améliorer ce traitement jusqu'à l'obtention de ce résultat minimalement acceptable.

5.4. Analyse complémentaire : placettes forestières réelles (étapes 17 à 21)

5.4.1. Sites d'étude

Il s'agit de données issues d'une campagne de terrain réalisée à deux reprises, en 2013 puis en 2015 par une équipe d'étudiants de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) (Martin-ducup et al., 2016, 2017) sur 6 sites répartis dans l'Est du Québec, au Canada. Chaque placette est d'abord scannée dans son état original (figure 19, données du groupe A) puis scannée à nouveau deux ans plus tard après avoir été élaguée des arbres compétiteurs présents autour d'un arbre cible (figure 19, données du groupe B). Les scans lidar-t utilisés dans cette étude reposent sur un échantillon de 6 placettes circulaires extraites des 6 sites de cette campagne. Ces six placettes sont principalement

composées de peuplements pures et mixtes de sapins baumier et d'érables, tous de catégorie mature (20 ans et plus). Toutes les placettes sont centrées sur un arbre cible identique entre les deux séances de prise de données. La stratégie de cible utilisée comporte 4 scans périphériques positionnés autour de l'arbre cible.

5.4.2. Données utilisées

Les données recueillies proviennent toute du même lidar terrestre : un Focus 3D du constructeur FARO®. La base de données qui a été utilisée est exclusivement constituée de nuages de points avec pour chacun d'entre eux les coordonnées spatiales X, Y et Z. Il s'agit donc des nuages de points multi-scans avant et après dégagement des arbres compétiteurs autour de l'arbre cible (figure 16, étape [17] et figure 19).

5.4.3. Prétraitements des données

Les premières étapes de préparation des données sont réalisées par l'intermédiaire d'un logiciel propriétaire fournis par le constructeur (FARO® Scene). Tout d'abord les nuages de points sont alignés (figure 19) en respectant la stratégie de cible utilisée. Cela revient à exécuter un algorithme de détection automatique en 3D des repères sphériques disposés tout autour de l'arbre cible. Se rajoutent à cette première étape, un filtrage (points fantômes, bruit), un redimensionnement (élimination des points en dehors de la zone d'intérêt) et une conversion des différents nuages de points afin de faciliter le traitement des données avec le logiciel Computree⁵ v3.

5.5. Comparaison et analyse

Le processus de comparaison illustré dans la figure 19 consiste à récupérer pour les six différentes placettes, une paire de scènes (A+B) constituées chacune de 4 nuages de points alignés. Ceci donne en entrée du processus de traitement une collection de $6 \times 2 \times 4 = 48$ fichiers ascii contenant des nuages de points lidar bruts et alignés. Les scènes A contiennent des scans lidar des placettes non

⁵ <http://computree.onf.fr> ; <http://rdinnovation.onf.fr/>

dégagées (figure 16, [18.a]) et les scènes B ceux des placettes après dégagement des arbres cibles (figure 16, [18.b]). Le patron suivit pour toutes les scènes (A et B) comprend 4 scans répartis régulièrement autour de l'arbre ciblé. Suite aux prétraitements réalisés sur l'ensemble des nuages de points, l'algorithme L-Vox est utilisé pour voxeliser chaque scène (figure 16, [19]). Il en résulte une paire de grilles de voxels pour chaque de scène.

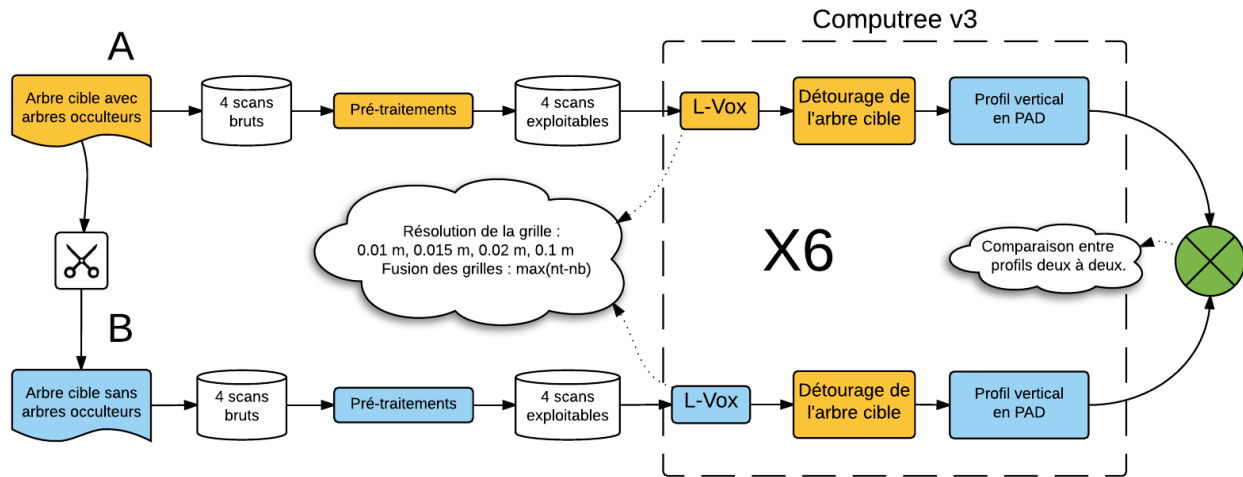


Figure 19 - Diagramme méthodologie détaillé de la comparaison des nuages de points avant et après dégagement.

5.5.1. Problème d'alignement des grilles A et B

Pour les scènes A, il est nécessaire de découper les grilles de voxels (figure 16, [20] et figure 19) pour essayer le mieux possible de ne conserver que les voxels appartenant à l'arbre cible des grilles de voxels B. Le but de cette opération est d'être en mesure de comparer que les voxels concomitants pour chaque paire de données A+B. Cependant, les coordonnées des voxels non nuls ne peuvent pas être récupérées dans les grilles A pour être appliquées par masquage aux valeurs des grilles B correspondantes car les scans sont réalisés à deux dates différentes et ils ne partagent pas la même base de coordonnées relatives. Un recalage à partir des données GPS de chaque grille est aussi impossible car il n'y a pas assez de points enregistrés (minimum trois) pour chaque scène de manière à pouvoir les aligner. De plus, un alignement par coordonnées GPS aurait été trop approximatif pour des voxels de l'ordre du décimètre. Ainsi, puisqu'il n'y a aucun système de repère pour aligner les grilles de voxels avant et après dégagement, le moyen utilisé est un recalage visuel des grilles, accompagné d'un découpage manuel des voxels qui n'appartiennent pas à l'arbre

cible dans les deux jeux de données. De cette manière, l'opérateur chargé de la découpe des grilles de voxel avec l'outil Computree est capable de retrouver dans les grilles de voxels non dégagées l'arbre cible, ou du moins une partie de celui-ci en observant son apparence dans la grille de voxels où le matériel occulteur est dégagé.

5.5.1. Analyse comparative

Suite à la préparation détaillée dans le précédent paragraphe, les grilles de voxels sont comparées deux à deux (figure 16, étape [21]) après avoir été réduites sous la forme de profils verticaux de la même manière que dans l'analyse principale. La différence dans ce cas est que les données de références proviennent des profils de végétation issus des nuages de points réalisés après élagage en considérant que ces derniers révèlent de profils fidèles aux profils réels de la végétation.

5.5.2. Analyse de sensibilité à la dimension de voxel

De la même manière que dans la première partie consacrée à l'analyse des données pour les placettes simulées (figure 16, étape [13]), il s'agit de réaliser une étude de sensibilité sur la dimension des voxels dans le cas des placettes réelles. Les tailles de voxels utilisés sont de 10 cm, 15 cm, 20 cm et 1m pour chacune des six placettes avant et après dégagement. Le but est d'observer d'éventuelles variations dans les résultats comparatifs avant et après dégagement en fonction de la taille des voxels. Une grille de voxels avec une résolution allant jusqu'à 1 m a été choisie pour éviter le cas où les trois premières tailles de voxels indiquées ci-dessus provoquent trop peu de variations sur les similitudes des profils verticaux pour en déduire des tendances.

6. Résultats et leur interprétation

6.1. Génération des placettes et des données lidar-t de simulation

Quatre scènes de peuplements d'arbres ont été générées à l'aide du modèle L-Architect à partir de données de base provenant de l'inventaire forestier. Les quatre placettes d'origine ont été choisies de manière à obtenir le plus grand contraste des paramètres suivant (tableau 1) : le nombre et la densité des tiges, les espèces, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP), l'âge, la hauteur et la densité de la couronne.

Tableau 1 - Caractéristiques des quatre peuplements forestiers de référence.

Les quatre premières lignes du tableau après la ligne d'entête donnent le nombre de tige présente pour chaque espèce dans chacune des quatre placettes d'inventaire. Les trois lignes suivantes donnent le nombre total de tige par placette ainsi que leur classe d'âge et de hauteur. Les deux lignes d'après donnent la moyenne et l'écart type du DHP des tiges. La dernière ligne donne la densité moyenne de la couronne des arbres.

Numéro d'inventaire			10100317	18600518	18900805	19502312
Espèces	11	Épinette Noire	0	1	70	18
	13	Épinette Blanche	2	0	0	0
	21	Sapin Baumier	24	106	0	74
	71	Bouleau Blanc	2	2	1	1
Nombre total de tiges			28	109	71	93
Classe d'âge (en années)			121+	41 - 60	61 - 80	81 - 100
Classe de hauteur (en m)			12,6 - 15,5	9,6 - 12,5	6,6 - 9,5	12,6 - 15,5
DHP (cm)		moyennes	24,6	7,89	10,96	14,37
		écart type	8	2,67	2,8	4,54
Densité de la couronne			> 75 %	51 – 75 %	26 – 50 %	51 – 75 %

Un rendu photographique couleur a été réalisé sur chaque placette pour avoir un aperçu simple et représentatif du résultat final (exemple figure 20.a). Des sphères ont été rajoutées aux coordonnées exactes des simulateurs de scan lidar-t ainsi qu'un disque qui représente le niveau du sol et qui délimite le périmètre de la placette (voir annexe). Ensuite une simulation des scans lidar-t fut réalisée sur les quatre scènes produites avec L-Architect grâce à un modèle de capteur lidar-t décrits dans la méthode (exemple figure 20.b)

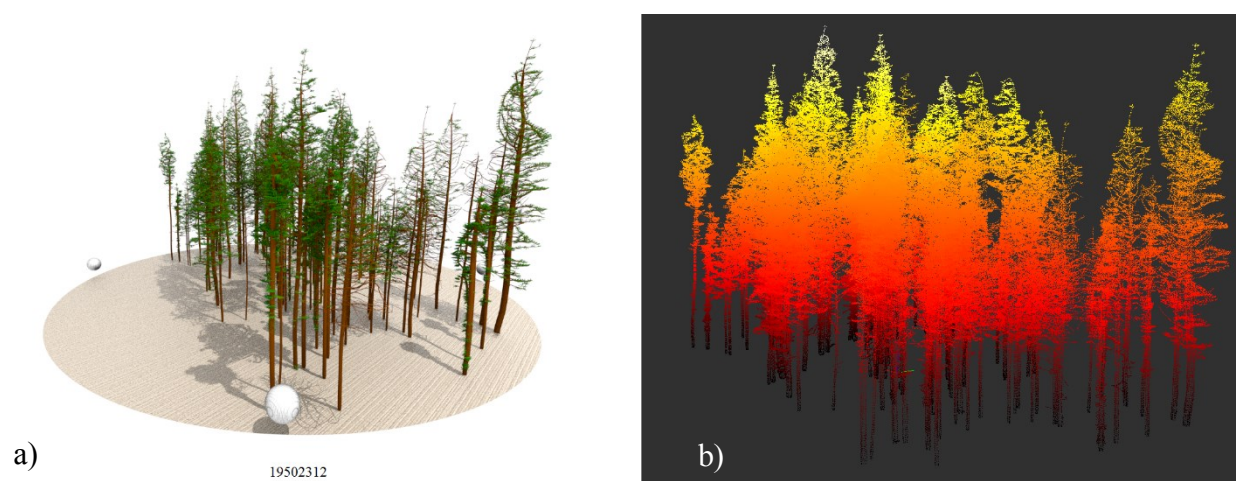


Figure 20 – Aperçu de la placette n°19502312 avant et après la simulation multiscan lidar.

La partie de gauche a) montre un rendu en 3D de la maquette forestière finement modélisée et la partie de droite b) donne une image du nuage de points simulé avec la coordonnée Z codée par un dégradé de couleurs.

Le tableau 2 procure la quantité totale de points dans les nuages de chaque placette et leur répartition en fonction des cinq scans lidar-t (disposés selon la figure 17). D'une part, la proportion de rayons retournés pour chaque placette est fortement liée à leurs caractéristiques forestières comme la concentration des tiges, la densité des couronnes et leur classe d'âge (voir le tableau 1). D'autre part, la contribution du scan central (scan 1) est toujours largement prépondérante, de 50 % à 80 % du total des points. Ces deux éléments portent à croire que le positionnement des scans joue un rôle important dans la détection du matériel forestier. Par conséquent, il semble important de minimiser l'occlusion dès l'étape d'acquisition en adaptant la disposition des scans à la configuration de la placette.

Tableau 2 - Nombre total de points et proportion pour chaque scan et par placette.

Toutes ces valeurs proviennent d'une simulation ayant une résolution angulaire de $0,036^\circ$ entre chaque faisceau laser.

Numéro d'inventaire	10100317	18600518	18900805	19502312
Nombre total de points	78 306 860	44 042 014	28 271 751	60 608 993
Scan 1	60,13 %	80,54 %	68,33 %	49,23 %
Scan 2	8,07 %	4,96 %	6,18 %	16,20 %
Scan 3	8,89 %	5,00 %	8,52 %	8,61 %
Scan 4	6,59 %	4,69 %	9,29 %	18,12 %
Scan 5	16,32 %	4,81 %	7,68 %	7,85 %

La forme des profils verticaux de la figure 21 démontre visuellement que la détection du matériel environnant par des scans lidar-t brut (en rouge) est peu représentative de la densité de référence ou réelle de la végétation (en bleu – produite avec L-Architect). Ces graphiques illustrent les effets de l'échantillonnage inégal dans les étages inférieurs et de l'occlusion dans les étages supérieurs de la végétation. Par exemple, dans le cadran supérieur droit de la figure 21, la courbe bleue se sépare en deux parties bien distinctes. Dans la première partie allant de 0 à 2 m de hauteur, la valeur de densité moyenne / couche est relativement constante autour de $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$ et dans la deuxième partie allant de 2 m jusqu'à 10 m environ, la densité décrit une parabole. D'ailleurs ces deux parties sont visibles plus ou moins distinctement sur toutes les courbes bleues des 4 placettes de la figure 21. Par contre, toujours sur le cadran supérieur droit, la courbe rouge ne suit pas cette tendance en deux parties. En effet, la courbe rouge décrit plutôt une seule forme parabolique qui part du sol pour croître rapidement jusqu'à une valeur maximale située dans le premier quart de la hauteur totale de la végétation pour ensuite décroître plus lentement jusqu'à atteindre la hauteur maximale. De la même façon, ce comportement se répète sur les courbes rouges des quatre cadrans de la figure ce qui révèle là aussi une différence de forme répétée et symptomatique entre les profils provenant des deux types de données. Par ailleurs, sur le tableau 3, les quatre placettes montrent que le pic de densité maximale des retours est placé toujours beaucoup plus bas que le pic de densité maximale de la végétation de référence. De plus, sur chaque placette, les valeurs de la courbe du lidar-t simulée décroissent plus rapidement au-dessus du pic maximum que sur la courbe correspondante des données de référence. Cependant, même si le nombre de retours diminue de manière considérable dans les couches supérieures des nuages de points des scènes simulées, il y a tout de même des retours sur toute la hauteur de la végétation, jusque dans les étages les plus élevés. Le manque de représentativité du profil brut des données lidar-t simulées par rapport aux données de référence procure une démonstration claire du besoin d'une méthode de correction du signal pour prendre en compte les effets de l'occlusion et de l'échantillonnage inégal.

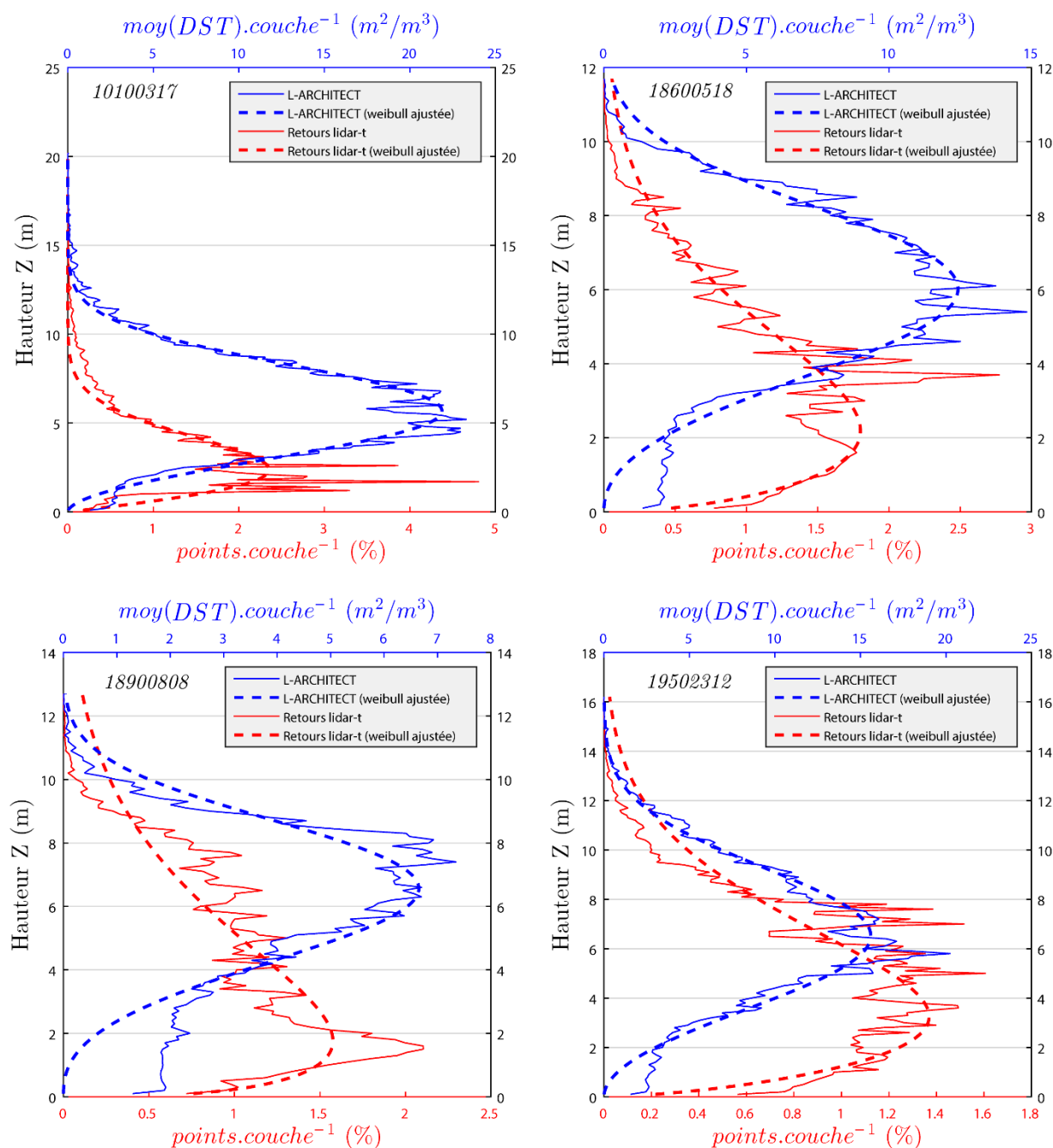


Figure 21 - Densité de points lidar versus la densité de végétation de référence (L-Architect).

Les quatre cadrans mettent opposition, pour chacune des 4 placettes, les profils verticaux de densité moyenne de végétation par couche de voxel (en bleu) avec les profils verticaux de densité moyenne de points retournés par couche de voxel (en rouge). Les courbes en trait continu bleu sont celles issues de la matrice de référence procurée par le modèle L-Architect et elles sont exprimées en DST moyen / couche. Les courbes en trait continu rouge sont celles issues de la matrice de densité brute de point qui comptabilise le nombre de points retournés par voxel et elles sont exprimées en pourcentage de retour moyen / couche. Les courbes en trait pointillé rouges et bleues représentent des courbes de Weibull ajustées aux profils de la couleur correspondante. Le modèle de Weibull permet d'avoir une idée objective sur la forme des profils de manière à pouvoir les comparer plus facilement notamment dans le Tableau 3.

Tableau 3 - Hauteur Z (en m) des pics maximums des courbes de Weibull ajustées de la figure 21 avec le même code couleur.

Numéro d'inventaire	10100317	18600518	18900805	19502312
Z à la valeur maximale	5,7 m	6,0 m	6,6 m	6,5 m
	2,4 m	2,2 m	1,8 m	3,2 m

6.2. Opérations de correction avec L-Vox

Le nombre minimum de rayons entrants dans un voxel (noté $n_e = (b - c)$, figure 13) pour permettre à L-Vox de calculer l'IDR a été fixé à dix (cf. *Étape [8.a]*, figure 16). Ceci constitue un compromis pour permettre le plus grand nombre de voxels avec une valeur d'IDR calculée à l'aide de l'algorithme L-Vox tout en utilisant un seuil suffisamment élevé pour éliminer les voxels trop peu sondés, ce qui mènerait à des valeurs d'IDR non réalistes. Dans le tableau 4, les voxels qui ont été traités par L-Vox sont qualifiés de « voxels connus », car ils satisfont au minimum de dix rayons entrants par voxel ($n_e \geq 10$). Ces voxels connus se divisent en deux groupes, ceux qui contiennent du matériel végétal (voxels de valeur d'IDR connus et occupés) et ceux qui n'en contiennent pas (voxels de valeur d'IDR connus et vides). Tous les autres voxels ont été classés dans « voxels inconnus », car ils n'ont pas pu être traités par L-Vox ($n_e < 10$). Dans ces voxels inconnus, il a fallu établir les deux mêmes groupes, ceux qui contenaient du matériel des arbres (voxels de valeur d'IDR inconnus et occupés) et ceux qui n'en contenaient pas (voxels de valeur d'IDR inconnus et vides) grâce à l'utilisation de la grille binaire (cf. *Étape [10 a.]*, figure 16).

Le tableau 4 permet de constater les caractéristiques des différentes grilles de voxels en sortie de L-Vox et tout particulièrement en ce qui concerne leur taux de voxels inconnus. Ce taux représente une part non négligeable des voxels occupés d'une placette, avec une valeur comprise approximativement entre 8 % et 25 % en faisant le ratio suivant :

$$\frac{\text{voxels occupés (inconnus)}}{\text{voxels occupés (inconnus+connus)}} \quad (10)$$

Dès lors il apparaît que L-Vox ne donne pas une grille totalement corrigée et qu'il sera nécessaire de la compléter grâce aux valeurs connues avoisinantes. La variation de la taille des grilles des différentes placettes s'explique par la répartition des peuplements et leur hauteur maximale. La proportion de l'ensemble des voxels occupés, connus et inconnus, est aussi assez variable, mais toujours largement minoritaire. En effet, seulement 2 % à 6 % de la totalité des voxels renferme de

la végétation. En outre, le tableau 5 montre que cette faible proportion de remplissage des grilles est assez fidèle par rapport à la grille binaire et à la grille de référence malgré une légère perte par rapport à cette dernière. Cette perte s'explique soit par une quantité de végétation tellement petite dans certains voxels de référence qu'elle est indétectable par le simulateur de scans lidar-t, soit par l'occlusion totale de certains voxels.

Tableau 4 - Caractéristiques par placette des grilles de voxels (10 x 10 x 10 cm) en sortie de L-Vox, avec le nombre rayons entrants dans un voxel tel que $n_e = b - c$ (d'après la figure 13). Les pourcentages sont calculés par rapport à la totalité des voxels de la grille.

Numéro d'inventaire		10100317	18600518	18900805	19502312
Grille		235 × 283 × 202	165 × 105 × 117	181 × 190 × 127	288 × 222 × 162
Total de voxels		13 434 010	2 027 025	4 367 530	10 357 632
Voxels connus (traités par L-Vox)	Tous $n_e \geq 10$	12 397 454	1 921 708	4 331 172	9 957 051
		92,28 %	94,80 %	99,17 %	96,13 %
	Occupé IDR > 0	212 632	96 575	79 924	208 336
		1,58 %	4,76 %	1,83 %	2,01 %
Voxels inconnus (non traités par L-Vox)	Tous $n_e < 10$	1 036 556	105 317	36 358	400 581
		7,72 %	5,20 %	0,83 %	3,87 %
	Occupé* $D_{\text{binaire}}=1$	69 075	23 171	7 818	53 484
		0,51 %	1,14 %	0,18 %	0,52 %

* Plein : voxel (d'état) inconnu jugé dans une zone occupée de végétation grâce à la grille binaire.

Tableau 5 - Pourcentage de voxels identifiés comme renfermant du matériel selon trois grilles de scène.

(1) selon la grille de référence de la maquette L-Architect, (2) selon une grille qui implique au moins un retour (point dans le voxel) et (3) selon la grille d'IDR incluant les voxels inconnus avec au moins un point retourné. Ce tableau ne considère que les grilles d'une résolution de 10 cm.

Numéro d'inventaire	10100317	18600518	18900805	19502312
Grille L-Architect	3,36 %	7,33 %	2,27 %	3,44 %
Grille binaire (retours ≥ 1)	2,10 %	5,91 %	2,01 %	2,53 %
Grille L-Vox + Voxels inconnus occupés	2,09 %	5,90 %	2,01 %	2,53 %

6.3. Estimation de la densité de végétation

Tout l'enjeu de ce projet consiste à pouvoir retrouver la densité de végétation dans l'espace ou sur un profil vertical à partir d'un nuage de points voxélisé. Ceci n'est possible qu'après avoir validé que la méthode de voxélisation en deux procédures (L-Vox et grille binaire de végétation) permet de retrouver convenablement les profils de distribution du matériel des scènes de référence. Pour comparer le nuage de points traités par la méthode de correction avec les données de référence, des régressions linéaires ont été réalisées sur trois types de données. D'abord sur les matrices dans leur intégralité (3D) puis sur les matrices projetées dans le plan XZ (2D) et enfin sur les profils verticaux en Z de ces matrices (1D). Bien que notre principal défi soit d'éliminer l'effet de l'occlusion et de l'échantillonnage inégal sur les profils verticaux, il semble aussi essentiel d'analyser le comportement de l'algorithme L-Vox sur les matrices entières en 3D ainsi que sur leur projection en 2D. En fait, il est plus difficile d'évaluer la valeur précise des voxels projetés dans le plan XZ que sur un profil vertical. De surcroît, cela s'avère encore plus délicat quand il s'agit de calculer la valeur de chaque voxel dans la matrice en 3D au complet. Cela s'explique simplement par le fait qu'une projection des valeurs de 3D en 2D va permettre une certaine compensation des valeurs aberrantes. Ce phénomène d'amélioration s'amplifie quand les matrices passent de 2D à 1D.

6.3.1. Qualité des voxels connus

Dans un premier temps, l'IDR est analysé tel quel, c'est-à-dire, directement en sortie de l'algorithme L-Vox après avoir été exporté sous forme de matrice. Cette dernière n'a subi aucune transformation en dehors des étapes obligatoires de réalignement et de recadrage. Le tableau 6 résume les résultats des régressions linéaires obtenus uniquement sur les voxels connus pour les trois types de données (3D, 2D, 1D). Tous les voxels de référence qui contiennent du matériel et qui se retrouvent comparés à des voxels inconnus et/ou vides dans la grille L-Vox sont écartés de cette régression linéaire. Ceci permet une première validation centrée sur les valeurs correctement calculées par L-Vox sans se préoccuper des voxels inconnus ou totalement occlus. Parmi ces valeurs, les R^2 sont significatifs, c'est-à-dire supérieurs à 0,645 pour les grilles 3D entières, supérieurs à 0,822 pour les projections en 2D et supérieurs à 0,969 pour les profils verticaux en 1D. Par ailleurs, les pentes de régression allant de 3,70 à 4,4 sont très stables sur toutes les placettes

et pour tous les types de données. Ceci confirme que l'algorithme L-Vox permet de retrouver convenablement une valeur de densité de végétation fidèle à la réalité tant que les conditions minimales d'application du calcul sont respectées. Par conséquent cela vérifie une partie importante de l'hypothèse en ce qui concerne la fiabilité du calcul L-Vox lui-même. Même si ces constatations sont insuffisantes, car elles négligent une part importante de voxels inconnus (de 8 % à 25 % des voxels pleins d'après l'équation 10) et totalement occlus, elles confirment néanmoins que les valeurs ainsi calculées sont suffisamment fiables pour servir de support aux valeurs inconnues. De plus, en ce qui concerne les profils verticaux, ces résultats pourraient être suffisants, car ils permettent déjà d'avoir des profils assez fidèles, sans avoir à se préoccuper de tous les autres voxels.

Tableau 6 - Résultat des régressions linéaires sur les voxels traitées uniquement par L-Vox.

Numéro d'inventaire		10100317	18600518	18900805	19502312
3D (xyz)	R ²	0,725	0,645	0,767	0,681
	RMSE	0,141	0,308	0,142	0,212
	PENTE	3,737	3,739	3,748	4,248
2D (xz)	R ²	0,920	0,822	0,912	0,874
	RMSE	0,010	0,036	0,012	0,018
	PENTE	3,748	3,792	3,853	4,415
1D (z)	R ²	0,996	0,969	0,989	0,987
	RMSE	0,001	0,008	0,002	0,003
	PENTE	3,738	3,660	4,057	4,429

6.3.2. Gestion des voxels avec une valeur d'IDR inconnue

Dans un second temps, la grille de voxels a été analysée dans son ensemble, ce qui inclut tous les voxels avec une valeur d'IDR inconnue (appelés voxels inconnus) du côté des données corrigées ainsi que la grille au complet sans filtrage du côté de la référence. Pour faire cela, trois niveaux de traitement des voxels inconnus ont été considérés. Le premier traitement consiste à mettre zéro tous ces voxels inconnus. Dans le tableau 7, cela correspond au premier algorithme et aux trois lignes statistiques qui s'y rapportent. Le deuxième niveau consiste à remplacer la valeur manquante des voxels inconnus par la valeur moyenne de tous les voxels connus et occupés ($IDR > 0$) de la couche verticale (de 10 cm) à laquelle ils appartiennent. Ce niveau de traitement correspond à la deuxième

ligne des algorithmes du tableau 7. Le troisième niveau consiste à reprendre l'algorithme de remplissage précédent, mais en laissant à zéro tous les voxels inconnus catégorisés comme vide par la grille binaire. Ce dernier niveau est présenté par les trois dernières lignes du tableau 7.

Tableau 7 - Résultat des régressions linéaires entre les profils verticaux (1D) des données de référence et voxelisées.

	Numéro d'inventaire		10100317	18600518	18900805	19502312
Algorithme	L-Vox + (inconnus = 0)	R ²	0,922	0,786	0,968	0,926
		RMSE	4,383	4,004	0,808	3,390
		PENTE	8,506	6,336	5,201	8,387
	L-Vox + (inconnus = moy)	R ²	0,993	0,963	0,962	0,752
		RMSE	9,985	1,667	0,880	5,573
		PENTE	1,432	3,015	3,481	2,693
	L-Vox + (inconnu = moy) + masque binaire	R ²	0,977	0,903	0,986	0,977
		RMSE	2,396	2,700	0,542	1,703
		PENTE	6,521	5,268	4,659	6,848

6.3.3. 1^{er} résultat avec : L-Vox + (inconnus = 0)

Dans cette toute première approche, l'influence des voxels inconnus a été étudiée et plus particulièrement celle de ceux qui s'avèrent contenir de la végétation. Pour cela, la valeur de tous les voxels inconnus a été fixée à zéro, sans distinction (figure 22, courbes bleues). Le tableau 7 montre que les valeurs de R² sont là aussi assez élevées, mais elles ont diminuées par rapport au tableau 6 pour les valeurs en 1D des profils verticaux. Ceci s'explique par la méthode de comparaison qui dans ce cas compare tous les couples de voxels de mêmes coordonnées venant des deux données sans exclure les inconnus ou les voxels vides. Ce résultat est donc beaucoup plus représentatif, car il porte sur l'ensemble des voxels, cependant, il sous-estime largement la valeur moyenne d'IDR des voxels inconnus puisqu'il les considère tous égaux à zéro. De plus, les coefficients directeurs des pentes ont tous significativement augmentés pour compenser la mise à zéro des voxels qui s'avèrent contenir de la végétation dans les grilles de référence. Ce qui est surtout important de remarquer c'est que les valeurs de ces pentes se sont éloignées les unes des autres. Autrement dit, il devient plus difficile de retrouver une valeur de densité de végétation, car la correction devient dépendante du milieu et donc moins prévisible. L'ordre des placettes classées

du meilleur au moins bon résultat a aussi changé par rapport au tableau 6 ce qui suppose un effet dépendant du milieu et donc l'ajout d'un biais non déterministe.

6.3.4. 2^{ème} résultats avec : L-Vox + (inconnus = moy)

Le paragraphe précédent montre des résultats qui sous-estiment la valeur moyenne de tous les voxels inconnus. C'est pourquoi, dans cette deuxième approche, la valeur moyenne de tous les voxels connus et occupés d'une couche ont été utilisés pour remplir les voxels inconnus sans distinction. Cette méthode a pour inconvénient de donner la même valeur moyenne à une grande quantité de voxels d'une couche sans savoir si ces voxels contiennent ou non de la végétation. Ceci a pour effet de dégrader encore plus la qualité des régressions linéaires des grilles 3D des projections en 2D. L'avantage cependant est un net rehaussement des valeurs surtout dans les étages supérieurs de la canopée là où l'occlusion est la plus forte et cela est appréciable en particulier sur les profils verticaux qui compensent fortement les erreurs de remplissage dans les grilles ce qui explique des R^2 relativement élevés.

6.3.5. 3^{ème} résultats avec : L-Vox + (inconnus = moy) + masque binaire

Le but ici est de reprendre la technique de remplissage du paragraphe précédent en masquant tous les voxels identifiés comme vides par la grille binaire. C'est-à-dire que les voxels inconnus qui ont été masqués par cette grille seront définitivement mis à zéro. Cette technique a l'avantage de rehausser les profils verticaux dans la partie supérieure des houppiers (figure 22, courbes noires) tout en conservant une certaine fidélité dans les valeurs de voxels de la grille 3D et dans les projections en 2D. Bien que les R^2 des régressions linéaires des profils verticaux ne semblent pas s'améliorer pour toutes les placettes par rapport à la deuxième méthode dans le tableau 7, ils restent cependant très élevés. Cela montre bien que cette manière de procéder est plus fiable que la précédente. Ceci permet de constater que sur l'ensemble des quatre placettes d'étude les méthodes de traitement des voxels inconnus permettent de retrouver les formes et les valeurs, ce qui améliore les résultats de l'algorithme L-Vox. Par ailleurs, sur tous les profils (figure 22, courbes noires) il est encore possible d'observer une certaine atténuation des valeurs de densité sur les parties supérieures des houppiers causée par l'occlusion qui n'a pas encore pu être corrigée. De plus, le tableau 7 montre que les pentes des régressions linéaires entre les profils L-Vox interpolés (en IDR)

et les profils de référence (en DST) sont encore relativement dispersés, ce qui empêche une bonne estimation du matériel végétal réel. Ceci peut s'expliquer par le manque de cohérence entre les unités de DST et d'IDR. C'est pourquoi le prochain paragraphe présente une comparaison de profils verticaux sur les quatre mêmes placettes simulées, mais avec la conversion des valeurs d'IDR en DST.

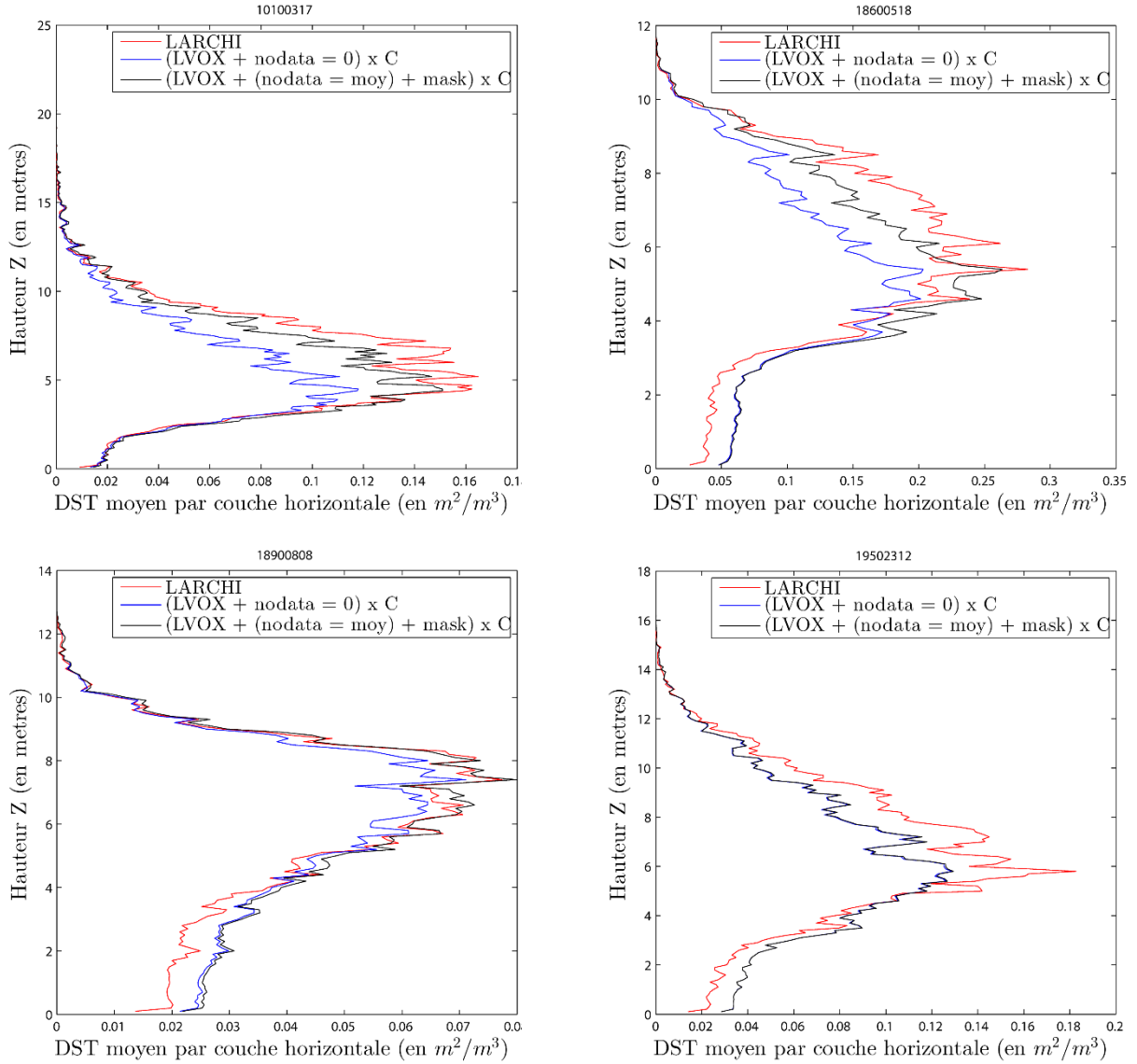


Figure 22 : Comparaison des profils verticaux d'IDR selon deux modes de correction des voxels occlus avec les profils de DST de référence (L-Architect) pour une résolution de 10 cm par voxel.

Le code couleur est le même sur les quatre cadrans. Les courbes rouges représentent les profils de végétation de référence tels que procurés par le modèle L-Architect en valeur de DST. Les courbes bleues donnent les profils verticaux de l'IDR en sortie de L-Vox avec une mise à zéro de tous les voxels inconnus. Les courbes noires représentent les profils verticaux de l'IDR en sortie de L-Vox avec une mise à la moyenne des voxels inconnus dès lors qu'ils ont été filtrés par le masque binaire.

6.3.6. Calcul de la DST

L'étape finale du traitement consiste à calculer la DST à partir des grilles d'IDR extrapolées dans la partie précédente en y appliquant l'équation 9 détaillée dans la sous-section 4.6.2.

Le tableau 8 montre des coefficients de corrélation R^2 très proches de 1 sur l'ensemble des placettes. Les meilleurs résultats sont obtenus sur la première placette majoritairement peuplée de sapins baumier mûres. Ces très fortes corrélations sont cohérentes avec les résultats présentés dans le tableau 7 obtenus avant l'application du calcul de la DST. De plus, la nouvelle donnée importante contenue dans ce tableau est la valeur de pente des corrélations linéaires. En effet, ces pentes qui étaient uniquement théoriques dans le tableau 7 prennent un nouveau sens dans le tableau 8 puisqu'elles mettent en concurrence deux profils verticaux exprimés en DST. Ceci prend donc une signification du point de vue forestier. Ces pentes sont en moyenne proches de 1, mais l'écart type est non négligeable. En effet, entre chaque placette et pour une même résolution l'écart de pente maximal va atteindre jusqu'à 38 % entre les deux dernières placettes à 10 cm. Par ailleurs, la valeur moyenne de la pente et sa variabilité ont tendance à diminuer quand la résolution augmente. Ces pentes proches de 1 permettent d'affirmer qu'une voxélisation telle que réalisée par L-Vox permet de retrouver le profil vertical de végétation d'origine simulé avec une bonne confiance. Cependant, les paramètres utilisés pour réaliser cette voxélisation n'ont pas permis de mettre en évidence un effet significatif de la résolution de la grille de voxels entre 10 et 20 cm sur le tracé des profils verticaux pour des nuages de points simulés.

Tableau 8 - Résultats des corrélations linéaires entre les profils verticaux de DST de L-vox vs L-Architect.

Le cadre vert rassemble les résultats présentés dans la figure 23, ceux dans le cadre orange sont présentés dans la figure 24 et ceux du cadre rouge dans la figure 25.

	Numéro d'inventaire		10100317	18600518	18900805	19502312	Moyenne	Écart type
Résolution	10 cm	R ²	0,977	0,918	0,966	0,972	0,96	0,03
		RMSE	0,034	0,094	0,017	0,033	0,04	0,03
		PENTE	1,31	1,13	0,92	1,48	1,21	0,24
	15 cm	R ²	0,994	0,916	0,984	0,970	0,97	0,03
		RMSE	0,030	0,096	0,012	0,035	0,04	0,04
		PENTE	0,99	0,91	0,75	1,17	0,96	0,17
	20 cm	R ²	0,985	0,876	0,987	0,971	0,95	0,05
		RMSE	0,028	0,116	0,011	0,034	0,05	0,05
		PENTE	0,89	0,81	0,67	1,03	0,85	0,15

De manière générale, pour la placette 10100317 (figure 23), la courbe rouge du cadran de droite de montre que la répartition verticale de l'ensemble des points donne beaucoup plus de retours pour les basses couches de végétation. Après 2 m, la proportion de points retournés décroît progressivement jusqu'à atteindre la moitié de sa valeur maximale à une hauteur de 5 m alors que la courbe du profil de référence en DST est toujours en phase de croissance. La courbe rouge, observée de manière plus détaillée sur le cadran de gauche, entre 4 et 12 m, permet de constater que l'écart entre les deux mêmes profils est important autant en termes d'allure que de proportion. Ceci montre l'irrégularité de l'échantillonnage spatial tel que procuré par un ensemble de scans hémisphériques en forêt. En effet, il y a beaucoup plus de points et donc plus d'information dans les basses couches de la végétation que dans les plus hautes strates assujetties à l'occlusion. De manière locale, des variations importantes sont aussi visibles sous forme de pics à 2 m qui n'apparaissent pas sur la courbe de référence. À l'inverse, toujours sur le cadran de gauche de la figure 23, la courbe L-Vox (en noir) est très proche de la courbe de référence (en bleu) aussi bien dans les bas étages que dans les étages supérieurs que ce soit à une échelle globale ou locale. C'est aussi ce que confirme le cadran de droite de la figure 23 avec la superposition quasi parfaite des deux courbes de Weibull correspondantes. Le cadran de gauche permet de voir que la hauteur de densité foliaire maximale est de l'ordre de 5,8 m sur les deux courbes. Toujours sur le cadran de gauche, il est possible d'observer encore quelques différences entre la courbe de référence et la courbe obtenue par voxélisation d'un nuage de points. En effet, la surface du bois des troncs est légèrement sous-estimée dans les 2 premiers mètres et les premiers étagements de feuille qui suivent sont quant à eux sensiblement surestimés jusqu'à un point d'équilibre aux environs des 6 m pour finir par une légère sous-estimation de la végétation dans les étagements supérieurs. Ces différences se vérifient sur la quasi-totalité des placettes quelque que soit la taille des voxels. Elles témoignent des dernières imperfections du système de correction et elles sont plus ou moins présentes en fonction de la force de l'occlusion dans une configuration forestière donnée. Ceci mène donc à dire que l'algorithme L-Vox a su corriger l'échantillonnage inégal dans les couches basses, mais aussi retrouver suffisamment d'information utile pour reconstituer finement le profil de végétation en unité de DST (m^2/m^3) dans les cas où l'occlusion est la plus favorable.

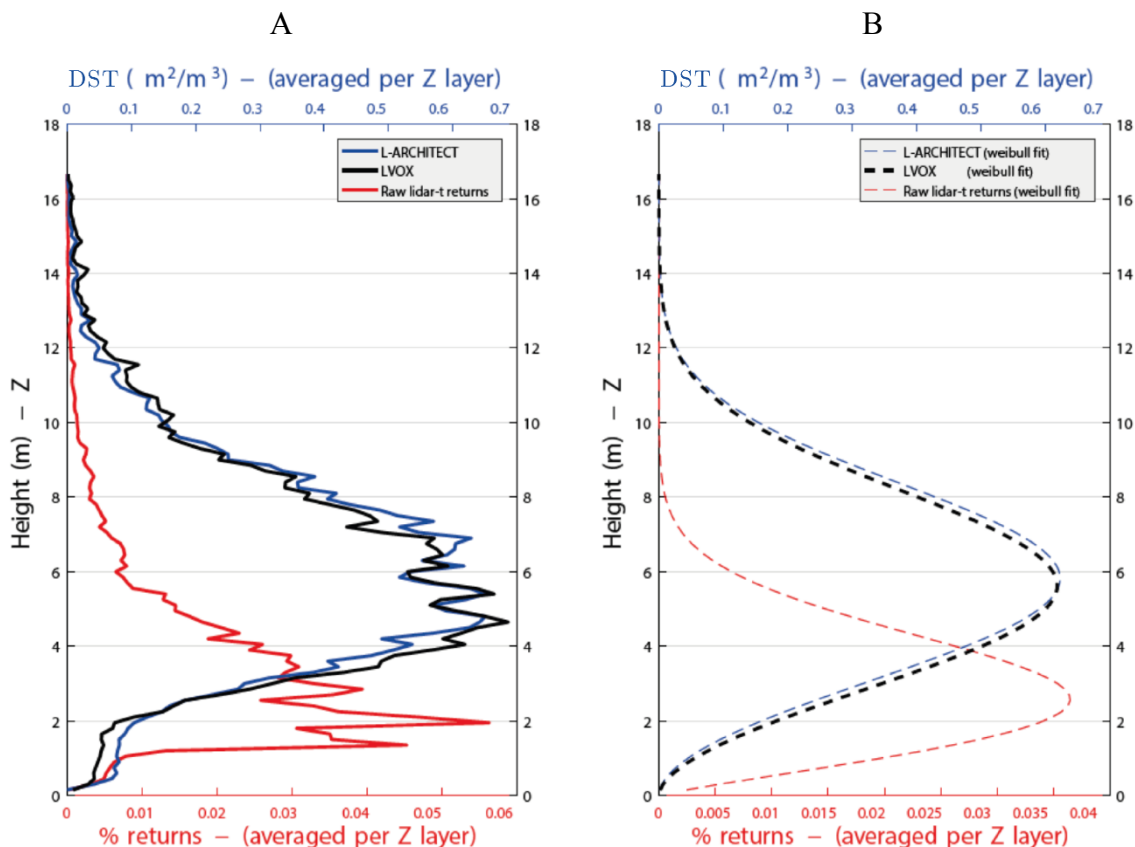


Figure 23 - Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (10100317 à 15 cm).

Le cadran de gauche noté A donne les profils verticaux bruts et le cadran de droite noté B montre les mêmes profils verticaux mais ajustés à des courbes paramétrées selon la loi de Weibull.

Dans le cas de la placette 18600518 (figure 24), les courbes suivent globalement le même comportement que dans le cas précédent mais elles ne procurent pas la même reconstruction du profil de référence après voxélisation. En effet, il est assez évident de remarquer une sous-estimation du matériel forestier au-dessus de 5 m de hauteur alors que les courbes se superposent finement dans les étages bas et médian. Ceci permet de déduire qu'une partie du matériel végétal n'a pas été comptabilisé dans l'algorithme L-Vox. De plus, la courbe de la moyenne des points retournés par couches (en rouge) est plus progressive et diminue moins rapidement que dans le cas précédent. Ceci permet d'en déduire que l'occlusion a été plus forte en raison de la présence d'une végétation plus dense et surtout plus homogène sur l'ensemble des couches. Cette forte occlusion a pu causer l'absence totale de points retournés dans des voxels contenant de la végétation situés dans les plus hauts étagements. Malgré ce déficit de détection de points dans les étages supérieurs il est possible d'observer une certaine corrélation sur les variations locales de la végétation. En

effet, les pics et les creux de végétation restent fortement corrélés entre la courbe de référence et celle obtenue après voxélisation.

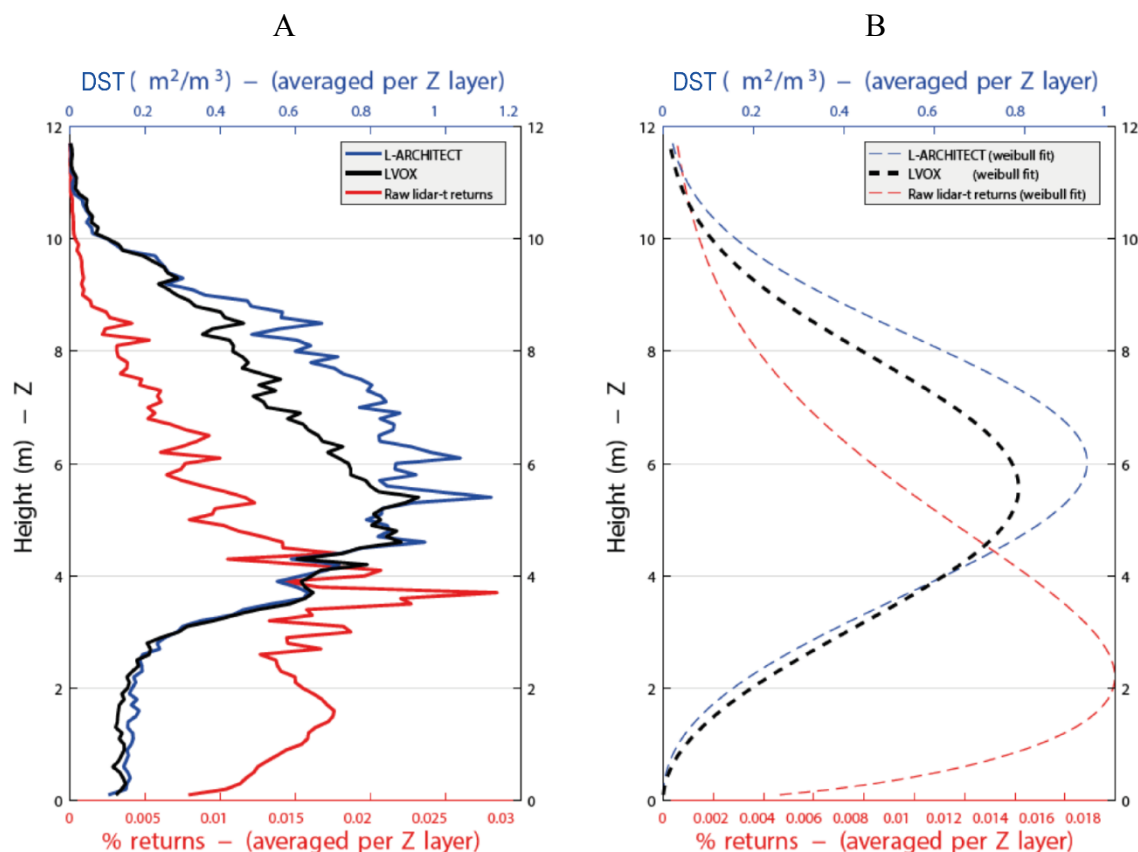


Figure 24 - Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (18600518 à 10 cm).

Le cadran de gauche noté A donne les profils verticaux bruts et le cadran de droite noté B montre les mêmes profils verticaux mais ajustés à des courbes paramétrées selon la loi de Weibull.

La figure 25 permet d'observer le troisième et dernier comportement représentatif retrouvé dans certaines des voxélisations réalisées sur nos placettes d'études. La placette n°18900805 utilisée dans cet exemple est principalement peuplée d'épinettes noires de 60 à 80 ans. Le nombre de tiges ainsi que la densité de chaque houppier procurent à l'ensemble de la placette un feuillage peu homogène à l'échelle de la placette et le moins dense de l'ensemble des peuplements modélisés dans cette l'étude. Dans ce cas, le profil de la végétation obtenu après voxélisation semble globalement surestimer le profil de référence, en particulier dans les couches les plus basses (< 8 m). Ceci est nettement visible en observant l'écart entre les courbes ajustées au modèle de Weibull sur le cadran de droite. Cependant, le cadran de gauche montre que les deux courbes de DST ont une allure similaire aussi bien à l'échelle globale que locale alors que la courbe rouge du

pourcentage de points de retournés par couche ne suit pas les mêmes tendances. Ceci confirme l'efficacité de l'algorithme L-Vox pour retrouver le profil de référence après voxélisation, mais que l'apparition d'une erreur constante est encore possible dans certaines configurations forestières. Ceci est dû à la calibration de l'algorithme réalisé sur l'ensemble des placettes d'études en ajustant certains paramètres dans le calcul de base de L-Vox, dans le calcul d'approximation de la DST ainsi que ceux de l'interpolation. Tous les paramètres utilisés au cours des étapes de calcul de L-Vox comme le nombre de rayons qui entrent dans un voxel ($n_e \geq 10$) ou le mode de fusion des grilles ($\max(n_e)$) jouent un rôle dans ce résultat. Cependant, les paramètres les plus déterminants dans cette erreur statique sont ceux qui concernent la gestion des cas d'erreur du calcul de l'indice de densité relative (IDR) et le calcul d'interpolation. Bien que l'objectif ait été de diminuer cette erreur statique, l'algorithme n'a pas pu s'affranchir de certaines imperfections dans certains cas limites. L'objectif est d'être le plus représentatif possible dans le cas de vraies placettes.

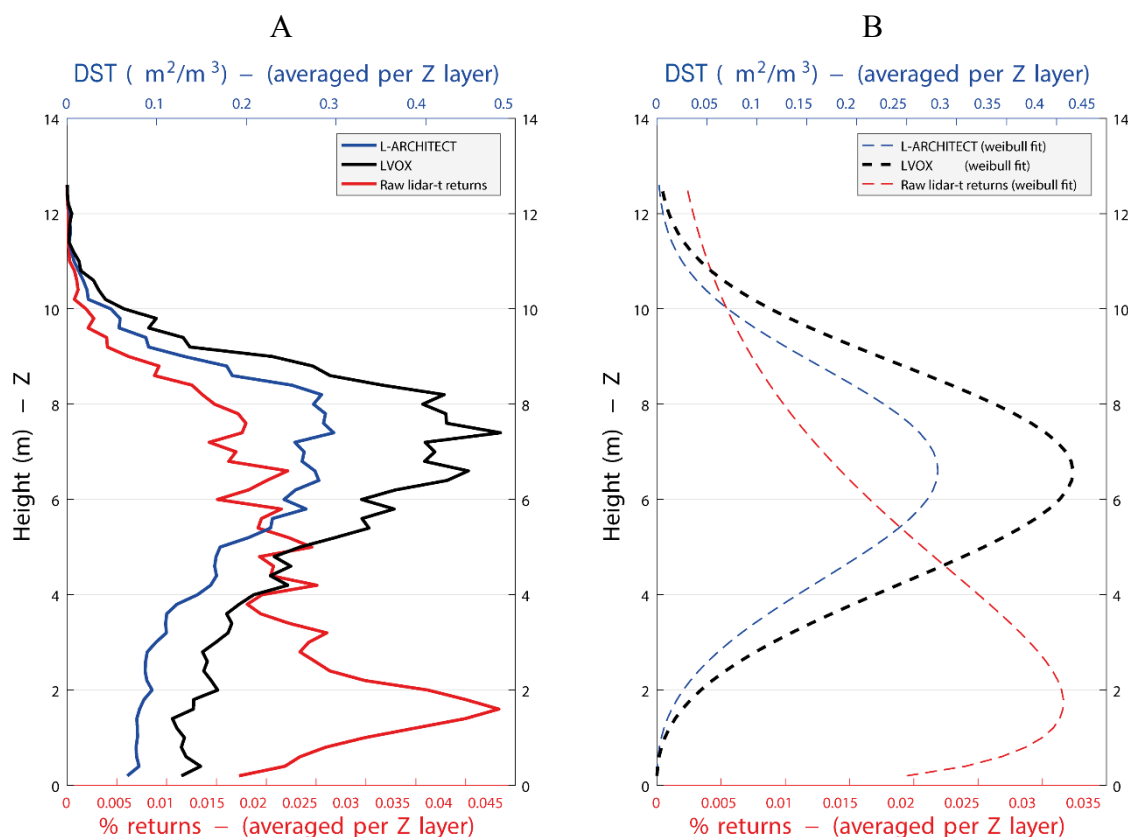


Figure 25 - Profils verticaux L-vox vs. L-Architect en DST (18900805 à 20 cm).

Le cadran de gauche noté A donne les profils verticaux bruts et le cadran de droite noté B montre les mêmes profils verticaux mais ajustés à des courbes paramétrées selon la loi de Weibull.

6.4. Résultats de test sur des placettes réelles (IDR vs DST)

6.4.1. Récapitulatifs des résultats traduits en DST

Le but de comparer cinq placettes avant et après le dégagement des arbres compétiteurs à un arbre cible est de faire la démonstration que sous des conditions d'occlusion très différentes, L-Vox permet de retrouver un profil similaire de l'arbre cible. Lorsque les compétiteurs sont présents, il y a beaucoup moins de faisceaux lidar qui rejoignent les portions supérieures (du haut) de l'arbre tandis qu'après dégagement, les signaux lidar sont beaucoup plus nombreux. Il est attendu que l'application de L-Vox normalise les valeurs de densité vers des valeurs suffisamment similaires dans les deux cas. L'analyse du

tableau 9 permet d'abord de remarquer une correspondance assez faible entre les deux profils verticaux de DST (en rouge) pour des résolutions de voxel allant de 10 à 20 cm. En effet, les coefficients de corrélation dépassent rarement 33 % sauf pour les placettes voxelisés à 20 cm où les mêmes coefficients varient plutôt autour de 50 %. De plus, la pente de la régression linéaire est toujours inférieure à 0,5 avec un coefficient de détermination R^2 faible, voire très faible. Ceci permet donc d'observer une mauvaise corrélation entre les profils voxelisés avant et après l'éclaircie réalisée autour des arbres cibles en valeur moyenne de DST. En outre, la correspondance entre les deux profils semble légèrement s'améliorer à 20 cm mais elle ne devient significative qu'à partir de 1 m de résolution. Les coefficients de corrélations augmentent jusqu'à plus de 80 % pour les deux premières placettes ce qui permet d'atteindre au total une corrélation moyenne de 69 %. Les régressions linéaires sont aussi très nettement meilleures que dans la partie supérieure du tableau puisqu'elles sont relativement stables autour de 0,7. Le coefficient de détermination reste proche de 0,5 pour l'ensemble de placettes ce qui exprime une confiance modérée en ce qui concerne la régression linéaire ainsi réalisée. Ceci peut s'expliquer cela par une compensation satisfaisante des erreurs de calcul avec de gros voxels alors que ces erreurs deviennent à l'inverse très présentes avec une petite dimension de voxel.

Tableau 9 - Résultats de comparaison des profils verticaux de DST d'un arbre cible avant et après le dégagement de la végétation périphérique.

Pour chaque couple de données (profil de l'arbre cible avant et après dégagement), le but est de retrouver le degré de ressemblance entre les deux grâce au coefficient de corrélation de Pearson (Corr) et à une régression linéaire simple de type $f(x) = a \cdot x + b$. L'abscisse correspond aux données avant dégagement et l'ordonnée aux valeurs après dégagement. Les cases vertes et rouges permettent de distinguer

respectivement les bons et les mauvais résultats par rapport à ceux attendus. Les peuplements représentés sont (EE) érablé/érable, (SE) sapin/érable et (SS 1,2,3) sapin/sapin à travers trois placettes différentes.

	Placette		EE	SE	SS 1	SS 2	SS 3	Moyenne	Écart type
Résolution	10 cm	Corr ⁶	0,47	0,24	0,43	0,18	0,48	0,36	0,12
		a	0,21	0,27	0,50	0,25	0,56	0,36	0,14
		R ²	0,22	0,05	0,18	0,03	0,26	0,15	0,09
	15 cm	Corr	0,41	0,32	0,25	0,18	0,50	0,33	0,10
		a	0,25	0,31	0,25	0,18	0,68	0,33	0,14
		R ²	0,19	0,10	0,06	0,03	0,25	0,13	0,08
	20 cm	Corr	0,68	0,88	0,33	0,22	0,38	0,50	0,23
		a	0,22	0,16	0,25	0,30	0,56	0,30	0,11
		R ²	0,48	0,81	0,11	0,05	0,17	0,32	0,26
	1 m	Corr	0,81	0,80	0,56	0,57	0,73	0,69	0,10
		a	0,44	0,88	0,74	0,77	0,86	0,74	0,12
		R ²	0,67	0,68	0,43	0,40	0,55	0,55	0,10

Par ailleurs, la correspondance entre chaque profil de végétation s'était substantiellement dégradée après l'application du calcul de conversion de grandeur physique des voxels pour passer de l'IDR à la DST. En effet, avant d'avoir ajouté le calcul de conversion de l'IDR en valeur de DST dans l'algorithme L-Vox, la même étude comparative avait été réalisée, mais en utilisant exclusivement des profils en valeur d'IDR. Cette première étude disponible dans le tableau 10 montre une meilleure correspondance entre chaque couple de profils verticaux voxelisés avec les mêmes résolutions. Ceci s'explique par le manque de réalisme dans le calcul de DST sur des placettes réelles, notamment avec des hypothèses sur l'homogénéité et la densité de la végétation non respectées pour être en mesure de considérer la végétation comme gazeuse à l'échelle du voxel comme préconisé par la loi de Beer-Lambert. Ceci rejoint les constats du paragraphe précédent qui fait état d'une amélioration croissante des profils dès lors que la taille des voxels augmente, car cela permet de mieux satisfaire ces hypothèses sur la turbidité du milieu. De plus le calcul de DST inclut de nouvelles approximations et de nouvelles erreurs de calcul qui s'additionnent à celles déjà réalisées dans les premières étapes du calcul L-Vox ce qui ne peut aboutir à de meilleurs résultats. Outre les différences, il y a aussi des comportements identiques entre les résultats en DST et ceux précédemment réalisés en IDR. Par exemple, sur le

⁶ Coefficient de corrélation linéaire de Pearson.

tableau 9, les deux premières placettes érable/érable (EE) et érable/sapin (ES) témoignent globalement d'une meilleure correspondance des profils verticaux que toutes les autres placettes de type sapin/sapin (SS) et ceci pour toutes résolutions confondues. Ce phénomène est aussi nettement visible sur les résultats en IDR sur le tableau 10. De plus, l'effet de l'augmentation de la taille des voxels sur l'amélioration croissante des résultats est présente tant pour les profils exprimés en DST que pour les profils exprimés en IDR. Pour finir, les pentes de régression linéaire sont stables pour chaque dimension de voxel, mais elles restent toujours inférieures à 1. C'est-à-dire que la végétation paraît toujours plus importante avant qu'après le dégagement des arbres cibles. Ces trois points communs entre l'étude comparative réalisée avec des valeurs d'IDR et celle avec des valeurs de DST permettent de mieux cerner les limites actuelles de L-Vox dans des conditions d'occlusion très élevées.

Tableau 10 - Résultats de comparaison des profils verticaux d'IDR bruts d'un arbre cible avant et après le dégagement de la végétation périphérique.

	#	Préfixe	Résolution (cm)	Dégagement	R ² (corrélation linéaire)	Corrélation* (entre 0 et 1)
① Érable Sapin	5	ES	20	Avant impossible	impossible	
	6	ES	20	Après impossible		
② Sapin / Érable	1	SE	10	Avant	0,60	75,64 %
	2	SE	10	Après		
	3	SE	15	Avant	0,27	66,92 %
	4	SE	15	Après		
	5	SE	20	Avant	0,55	76,48 %
	6	SE	20	Après		
③ Érable / Érable	7	SE	100	Tout	0,78	86,5 %
	1	EE	10	Avant	0,80	79,3 %
	2	EE	10	Après		
	3	EE	15	Avant	0,77	76,0 %
	4	EE	15	Après		
	5	EE	20	Avant	0,77	75,9 %
	6	EE	20	Après		
	7	SE	100	Tout	0,73	85,5 %
④ Sapin / dSapin I	1	SS1	10	Avant	0,86	33,84 %
	2	SS1	10	Après		
	3	SS1	15	Avant	0,67	10,76 %
	4	SS1	15	Après		

⑤ Sapin / Sapin II	5	SS1	20	Avant		
	6	SS1	20	Après	0,67	8,29 %
	7	SS1	100	Tout	0,78	86,5 %
	1	SS2	10	Avant		
	2	SS2	10	Après	0,0	8,7 %
	3	SS2	15	Avant		
	4	SS2	15	Après	0,39	46,7 %
	5	SS2	20	Avant		
	6	SS2	20	Après	0,45	56,6 %
	7	SS2	100	Tout	0,27	85,4 %
	1	SS3	10	Avant		
	2	SS3	10	Après	0,21	47,2 %
	3	SS3	15	Avant		
	4	SS3	15	Après	0,32	49,0 %
⑥ Sapin / Sapin III	5	SS3	20	Avant		
	6	SS3	20	Après	0,29	39,0 %
	7	SS3	100	Tout	0,54	74,1 %

6.4.2. Résultats favorables et biais provoqués par la méthode

Sur la figure 26, les profils verticaux en vert et en bleu respectivement avant et après dégagement sont relativement similaires et la tendance du nombre brut de points retournés par couche tracé, par la courbe en noir, présente un profil vraiment différent notamment dans les plus bas étages de la végétation. Ceci est une première constatation qui montre que L-Vox a permis de retrouver convenablement le profil de végétation d'un arbre donné malgré la présence de matériel végétal occulteur entre la position des différents scans lidar et de l'arbre cible. Bien que ces profils soient proches, ils permettent aussi d'apercevoir deux éléments de divergence significatifs qui restent plus ou moins visibles sur l'ensemble des placettes. Le premier est inhérent à la méthodologie utilisée, le deuxième est lié à certaines imperfections de l'algorithme L-Vox dans certains cas limites. Dans ce cas favorable de la figure 26, ce sont les biais occasionnés par la méthodologie utilisée qui apparaissent plus clairement et c'est d'ailleurs la raison pour laquelle ils sont plus facile à distinguer et à analyser. En effet, les deux cadrans de gauche de la figure 26 montrent une légère différence de forme entre le houppier avant et après dégagement. Le houppier avant éclaircie semble relativement homogène alors qu'il est visiblement très dégarni sur son flanc droit après l'éclaircie.

La première cause de divergence entre les deux profils peut s'expliquer par le mode de coupe de la végétation, mais aussi par tous les paramètres qui ont pu changer entre le moment de la première campagne d'acquisition lidar et le moment de la seconde après l'éclaircie comme la défoliation naturelle (maladie), le vent, la lumière, la position des scans, etc. À ces considérations de terrain se rajoutent d'éventuelles erreurs dans les étapes de prétraitement des données. En effet, chaque nuage de points a été sujet à des approximations au moment de l'alignement de scans et du filtrage des points considérés comme négligeables par le calcul L-Vox. Même si ces approximations ou ces simplifications nécessaires ont été limitées dans leur usage et contrôlées dans leurs impacts pour chaque jeu de données, il se pourrait que des légères imprécisions ajoutées les unes aux autres aient pu avoir des conséquences non négligeables dans les résultats de cette étude. Pour finir sur les imprécisions liées à la méthode, il faut mentionner le caractère manuel du détournement des arbres cibles. En effet, ces arbres cibles ont pu être extraits de leur environnement à l'aide d'un logiciel de traitement des nuages de points et d'un opérateur humain qui avait pour consigne de détourner au plus près les arbres cibles grâce à leurs coordonnées GPS et à quelques informations architecturales liées à la nature de la placette. Cette tâche était sujette aux erreurs de jugement éventuelles de l'opérateur en raison de la densité et de la complexité du couvert végétal. Le tableau A2 permet de remarquer que la placette Erable/Sapin (ES) a dû être totalement écartée de l'étude comparative en raison de l'incapacité d'extraire convenablement l'arbre cible de la placette.

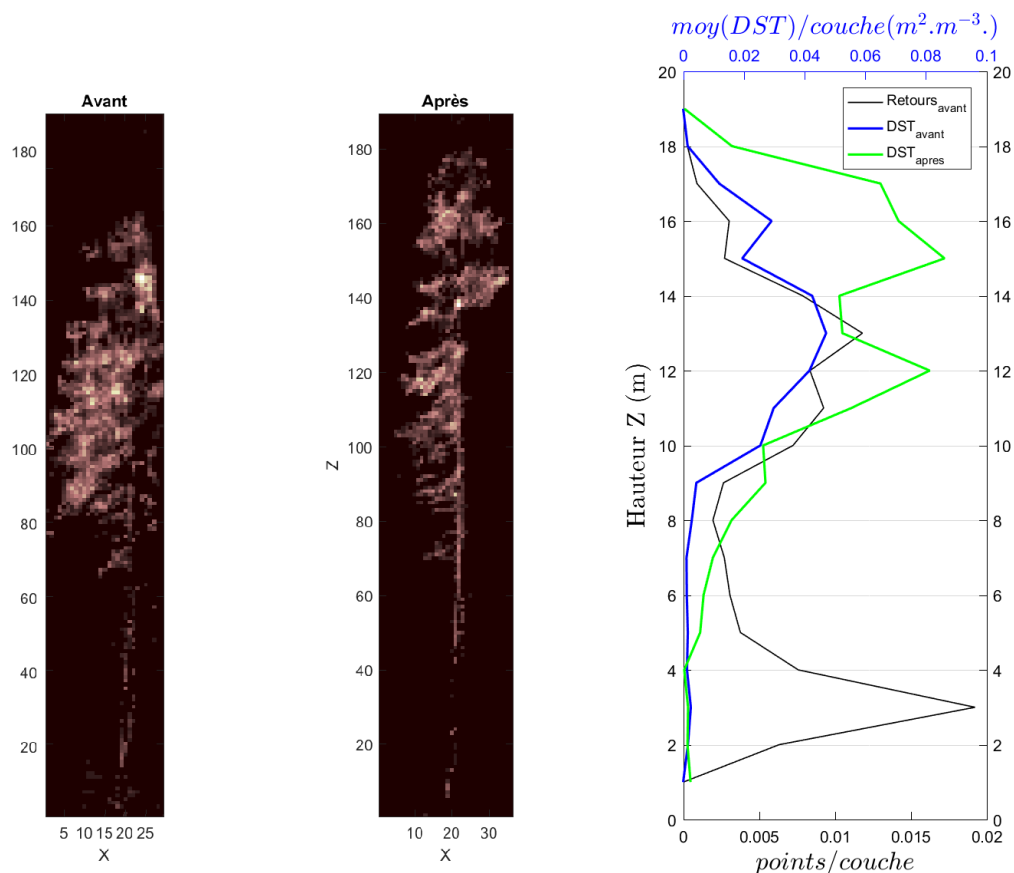


Figure 26 - Profils verticaux de PAD calculés par L-vox avant vs. après dégagement d'un arbre cible (Sapin / Sapin III / 1 m).

6.4.3. Résultats défavorables en raison de l'occlusion totale et des limites de l-vox

Dans cet autre cas défavorable présenté par la figure 27, outre les raisons évoquées dans la partie précédente, comme la petite taille des voxels et les éventuels changements intervenus entre les deux acquisitions lidars, il est possible d'observer un fort affaiblissement de la densité de points retournés au-delà d'une certaine hauteur (12 m). Cette forte diminution du nombre de points retournés est visible en comparant la forme des houppiers sur les deux cadrans de gauche de la figure 27. Par exemple, le haut du houppier avant dégagement atteignait 14 m d'après les scans lidars, alors qu'en réalité, après dégagement de la végétation, certains points sont visiblement retournés au-delà des 20 m. Ceci s'explique par une occlusion totale des points au-dessus d'une certaine hauteur. Malgré l'utilisation de 4 scans lidars autour de l'arbre cible certaines zones n'ont pas été suffisamment sondées pour apparaître sur le profil de végétation. Ce phénomène

d'occlusion totale n'a pas pu être corrigé par L-Vox malgré les calculs d'interpolation de voxels à partir du moment où il a retourné au moins 1 rayon. Cependant, les profils du cadran de droite de la figure 27 montrent que l'échantillonnage inégal a pu être corrigé et que la forme globale du profil avant l'éclaircie en bleu suit bien la forme du profil après l'éclaircie en vert mis à part dans la zone d'occlusion totale.

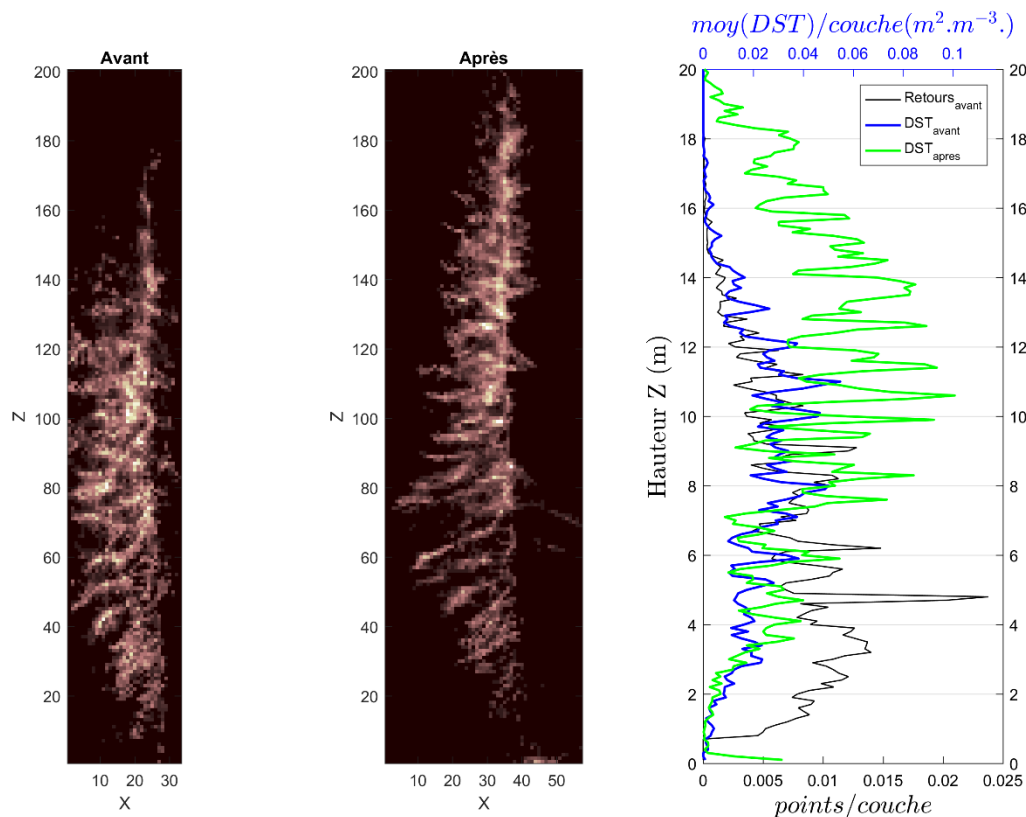


Figure 27 - Profils verticaux de PAD calculés par L-vox avant vs. Après dégagement d'un arbre cible (Sapin / Sapin II / 10 cm).

6.4.4. L'effet de la résolution sur la voxélisation

Un des objectifs était de mesurer l'impact de la résolution des grilles de voxel sur la précision du calcul d'un profil vertical de densité de la végétation. D'après les résultats obtenus aussi bien en termes d'IDR que de DST, plus la taille du voxel augmente et plus il est possible de faire correspondre les profils de végétation avant et après dégagement. Ceci s'explique principalement par effet de moyenne de l'erreur, mais aussi par une satisfaction plus grande des hypothèses de turbidité du milieu à l'intérieur du volume d'un voxel pour le calcul de la DST à partir de l'IDR.

Par conséquent, cela permet de démontrer que le choix de la résolution des voxel a un impact sur les résultats et qu'il doit être un juste compromis entre la recherche de la résolution spatiale la plus fine et l'obtention d'une mesure de densité de la végétation la plus juste. Le premier va privilégier une petite taille de voxel et l'autre une taille de voxel suffisante pour réduire les imprécisions du calcul. En outre, il est difficile d'utiliser le calcul de la DST de manière fiable si les voxels sont trop petits, même si toutes les autres hypothèses sont réunies comme le nombre minimal de rayons entrants à l'intérieur d'un voxel ($n_t - n_b$). En effet, l'hypothèse de Beer-Lambert devrait être adaptée pour des résolutions spatiales inférieures aux dimensions typiques des éléments de la végétation (Béland et al. 2014b).

7. Discussion

Les méthodes d'inventaire dites indirectes comme le lidar permettent de recueillir des informations sur un peuplement d'arbre de manière précise et non destructrice. La contrepartie est qu'elles demandent une capacité beaucoup plus importante de traitements et d'analyse que les données traditionnellement récoltées comme le DHP ou la hauteur totale des arbres. L'autre avantage significatif est de donner accès à des attributs encore inexplorés ou très peu utilisés en raison de leur grande difficulté d'accès comme la DST ou l'IST par exemple. Ces nouveaux attributs pourraient permettre d'accéder non seulement à un nouveau niveau d'analyse et d'éléments liés à la biologie de l'arbre, mais aussi au niveau de l'écologie forestière à l'échelle des peuplements, des régions et des pays. Pour le lidar, l'enjeu réside dans la maîtrise de la donnée matérialisée par les nuages de points.

7.1. La réponse à l'occlusion

7.1.1. La stratégie d'acquisition multiscan

Le manque d'information dans certaines zones d'une placette forestière porte un préjudice important sur l'ensemble des données capturées par la technologie lidar, qu'elle soit terrestre ou aérienne. Cela a un impact direct sur la qualité des attributs forestiers qui dérivent des nuages de points (Van der Zande et al., 2006). C'est pourquoi, avec ce travail de recherche, d'autres initiatives doivent être prises pour endiguer ce problème complexe et récurrent. La première étape influente

dans cette problématique concerne la stratégie d'acquisition lidar in-situ. Il est maintenant acquis que l'utilisation de scans multiples est nécessaire pour réduire significativement le problème d'occlusion. Il s'agit là de faire attention à choisir des positions de scan pertinentes et en quantité suffisante. Cela requiert certaines connaissances techniques particulières et de l'expérience de la part des opérateurs humains sur le terrain de manière à optimiser le volume sondé par les faisceaux lidar. Outre l'efficacité de la stratégie d'acquisition se rajoute l'importance des performances de la machine utilisée et de la technologie sous-jacente. En effet, les instruments (capteurs) lidar diffèrent dans leurs caractéristiques d'acquisition : densité de points, calcul de la distance, divergence du faisceau. Entre autres, l'utilisation de lidar à forme d'onde complète (full waveform) semble particulièrement adaptée pour sonder efficacement le couvert forestier (Strahler et al., 2008). Pour minimiser davantage l'occlusion, d'autres méthodes alternatives pourraient compléter une approche par lidar terrestre comme des lidars mobiles et des lidars embarqués dans des avions ou sur des drones. Comme tous ces modes d'utilisation du lidar souffrent de l'occlusion, la fusion des données issues du lidar terrestre et aérien (Hosoi et al., 2010) pourrait contribuer à améliorer la capacité d'estimation des attributs forestiers.

7.1.2. La quantification de la végétation

Grâce à la discrétisation en 3D de l'espace, il devient possible de stocker pour chaque volume élémentaire de l'espace des paramètres utiles pour détecter les zones avec un déficit d'information. La voxélisation permet cette détection, mais elle permet aussi de mettre en place des solutions de correction grâce aux paramètres ainsi collectés. C'est ainsi qu'une solution d'interpolation relativement simple basée sur le remplissage des voxels occlus soupçonnés de renfermer de la végétation grâce à la valeur moyenne de voxels avoisinants sur la couche horizontale a pu être mise en œuvre (Wilkes et al., 2017). Dans la littérature, de nombreuses approches existent pour tenter de quantifier la végétation à l'échelle de la placette (Leblanc et al., 2014; Zhao et al., 2015) ou à l'échelle du voxel (Béland et al. 2014a; Grau et al., 2017) à l'aide du lidar. Par contre, il est plus rare de voir ces approches appliquées à des environnements fortement occlus. À cet égard, la solution mise en place dans cette étude apporte non seulement une méthode fine d'estimation de la végétation mais aussi une certaine résilience à l'occlusion. Une autre méthode qui a été testée pour s'affranchir de l'occlusion consiste à recréer de manière virtuelle une placette réelle grâce à ses

paramètres architecturaux (Côté et al., 2009). Cette approche (L-Architect) semble porter ses fruits dans le cadre des placettes utilisées comme référence dans cette étude à condition d'être capables de recréer le plus fidèlement possible la réalité du terrain. Par exemple, un manque de végétation sous le couvert comme des tiges naissantes, de la végétation basse ou des chablis peut porter atteinte à une reconstitution fidèle du feuillage et de la végétation en général. Cependant, l'autre avantage de L-Architect est d'être en capacité de mesurer très finement la surface foliaire ainsi que de faire évoluer les modèles dans le temps car ceci permet de faire des estimations particulièrement précises et prédictives de certains attributs forestiers.

7.1.3. Validation dans un environnement contrôlé sans biais

L'utilisation de maquettes de type L-Architect dans cette étude à des fins de validation du processus de correction de l'occlusion lui confère l'avantage premier de ne pas ajouter de biais supplémentaire dans les comparaisons. De plus, ces maquettes ont permis supporter la simulation de scans lidar et de fournir une donnée fiable sur la densité de la végétation de référence. Par ailleurs, la simulation de capteurs lidar avec PBRT s'est avérée efficace grâce à la mise en place d'un patron de lancer de rayons proche de celui d'un vrai lidar par calcul du temps de vol ou par déphasage de l'onde reçue par rapport à l'onde envoyée. Les nuages de points simulés de cette manière présentent une occlusion similaire à ce qui est observé sur des placettes réelles ce qui vient confirmer la légitimité de leur utilisation dans notre étude. L'autre avantage de l'utilisation de ce genre de maquette dans le processus de validation est non seulement l'absence de toute intervention humaine sur le terrain, mais surtout l'absence de récolte de feuilles ou de destruction du milieu naturel à des fins de mesure comme cela a pu être fait dans d'autres études similaires (Béland et al. 2011). Ces maquettes sont toutefois imparfaites notamment dans l'absence de chablis, de sol et d'un sous étage en général, rendant la tâche de correction de l'occlusion anormalement facile pour L-Vox. C'est d'ailleurs ce qui transparaît dans les résultats de comparaison puisque le remplissage des voxels inconnus n'entraîne que peu d'écart avec les résultats obtenus avant interpolation en ce qui concerne les profils verticaux. Cela veut simplement dire que leur nombre ainsi que leur position n'étaient pas significatifs et donc que l'occlusion était relativement modérée au sein de maquettes simulées en raison de l'absence de toute cette végétation qui environne normalement un peuplement.

7.1.4. Application dans des forêts réelles

L'avantage de la seconde partie de cette étude est qu'elle utilise des données réelles obtenues à partir de scans lidars réalisés en forêt. Ceci veut dire qu'il ne peut pas y avoir de sous-estimation de l'occlusion comme cela pouvait être le cas avec les cas des maquettes virtuelles. Les résultats attestent que L-Vox permet de retrouver des profils de végétation de manière fiable à condition d'éviter l'occlusion totale. En effet, sur quasiment toutes les placettes, le profil avant dégagement décrit correctement le profil retrouvé après dégagement au moins dans les parties inférieures du houppier. Par contre, l'algorithme d'interpolation des voxels peu sondés ne permet de corriger l'IDR que s'il y a minimalement un retour d'enregistré dans un voxel, sinon il est considéré vide. Les profils retrouvés tronqués à partir d'une certaine hauteur sur certaines placettes sont le résultat de cette limite conceptuelle de l'algorithme qui a été mis en place. Par ailleurs, un des problèmes importants survenu dans la réalisation de cette méthode a été de recalcr des nuages de points obtenus à deux dates différentes, sur les mêmes placettes sans aucun repère géographique en commun. Ceci a nécessité le recalage manuel des grilles ainsi que le découpage à la main de l'arbre cible sur toutes les grilles de voxel. Ce processus a pu ajouter une source d'erreur dans les calculs de correspondance par la suite. L'autre inconvénient dans cette méthode est l'absence de contrôle et d'information sur la nature des modifications physiques qui ont été réalisées dans la placette au moment de la coupe de dégagement des arbres responsables de l'occlusion. Cette application avec des données réelles a quand même permis de s'assurer de l'effet correctif de L-Vox sur l'occlusion notamment et plus particulièrement dans les résultats exprimés en valeur d'IDR dans les peuplements mixtes. Par contre, l'ensemble des biais rajoutés ne permet pas de quantifier précisément le degré de correction de l'occlusion avec cette méthode. De plus, les placettes réelles ont permis de mettre en lumière les limites de l'algorithme notamment sur des placettes fortement occluses comme les peuplements exclusivement composés de sapins de différentes classes d'âge.

7.2. De l'IDR à la DST

Les attributs forestiers ne sont utiles que s'ils sont réutilisables, compréhensibles et adoptés par le plus grand nombre parmi les acteurs de la foresterie. L-Vox donnait au départ une valeur d'indice

de densité relative (IDR) difficile à exploiter, car elle n'était pas reconnue dans les attributs classiques comme ceux fournis par les placettes L-Architect par exemple. Cela avait pour conséquence d'empêcher une lecture satisfaisante des résultats, mais surtout d'être incompatibles avec les données de référence. C'est pourquoi une nouvelle étape a été introduite dans le calcul de manière à convertir la valeur d'IDR en DST. Cette nouvelle étape utilise une version simplifiée de la loi de Beer-Lambert telle que proposée dans le travail de Béland et al. (2011). Cette conversion a donné des résultats satisfaisants dans le cadre d'une comparaison avec des arbres de référence simulés dans la première partie. En effet, des profils verticaux de végétation très similaires aux profils de référence ont pu être extraits. Dans tous les cas de placettes simulées, les résultats trouvés avant et après la conversion des valeurs de densité d'IDR en DST n'ont montré que peu de différences. Cependant, le procédé semble atteindre ses limites dans certaines placettes réelles très occluses comme dans les tests complémentaires menés sur des placettes réelles de sapins et d'érables. Par ailleurs, une autre particularité et difficulté de ce genre d'attribut est d'être relativement universel à tous les types de feuillage et de végétation, car ils ne considèrent que la surface de la végétation. Cependant, les paramètres architecturaux ne sont pas les mêmes pour des feuillus que dans le cas d'aiguilles ou de pousses de conifères, ce qui a d'importantes conséquences dans le calcul de la DST. En effet, l'algorithme L-Vox ne permet pas de retrouver dans toutes les configurations forestières la valeur exacte de la surface de la végétation pour chaque élément cubique élémentaire de la placette. Ce processus nécessite une phase de réglage, d'amélioration et de calibration pour chaque grande famille de peuplement. Il faudrait par exemple pouvoir distinguer trois types de peuplement comme ceux exclusivement constitués de conifères, de feuillus et ceux qui se composent d'un assemblage des deux. Cette classification des placettes en fonction de leurs espèces dominantes permettrait d'améliorer le choix des nombreux paramètres intrants dans le calcul de la DST comme la taille, la forme, l'indice de groupage et l'orientation des feuilles. Ceci améliorerait significativement la précision, mais surtout la fiabilité du calcul. Par ailleurs, cette solution semble permettre une bonne reconstruction principalement grâce à un effet binaire de L-Vox qui a tendance à se renforcer quand la taille du voxel décroît en dessous de 20 cm. En effet, la présence ou l'absence de végétation dans un voxel va déclencher ou non son calcul de densité relative. De plus, les différentes valeurs calculées dans les voxels connus sont très proches d'une même valeur alors que tous les autres voxels sont mis à zéro. Ce qui laisse penser que globalement la grille de densité relative telle que procurée par L-Vox ne contient que deux valeurs

différentes. Ce mécanisme est de plus en plus présent quand la taille des voxels diminue. C'est ensuite la sommation par couche qui va, par présence ou absence successive de végétation dans les voxels, pouvoir dessiner des profils conformes au profil de référence. Grâce à la reconstruction multiscan il devient possible de retrouver une grille très fine de présence ou d'absence de végétation en 3D et c'est ce qui permet d'obtenir des profils de végétation fidèles en valeur d'IDR. Ensuite, les données contenues dans les grilles L-Vox sont utilisées pour calculer une DST paramétrée par de nombreuses variables tout au long du processus ce qui permet de retrouver des profils verticaux très proches de profils d'origine. Pour améliorer le calcul L-Vox, il faudrait pouvoir utiliser les coordonnées vectorielles des rayons lancés par l'instrument lidar de manière à se rapprocher le plus possible de la réalité et à ne pas faire d'erreur sur un lancer de rayons théoriques.

7.3. Importance pour caractériser la forêt

7.3.1. Pour l'inventaire forestier

L'apparition de méthodes robustes pour quantifier en 3D la surface ou la densité de surface de la végétation dans un milieu forestier peut se révéler utile pour plusieurs attributs de l'inventaire forestier. En effet, cette matrice de végétation permet de retrouver la forme de la couronne de l'arbre et ainsi faire apparaître les différentes relations de compétition qui existent entre les spécimens d'un même peuplement. Par ailleurs, ces matrices de végétation permettent de retrouver la hauteur de l'arbre, ainsi que son volume. Dans le cas d'une étude sur la régénération après un feu, ou simplement sur le suivi de croissance d'un spécimen à différentes dates, l'accès à des matrices de végétation normalisées à différentes époques pourrait être pertinent.

7.3.2. Pour l'écologie forestière

Les matrices 3D de végétation normalisée ainsi que ses produits dérivés que sont les projections en 2D et en 1D, peuvent être de bons indicateurs écologiques de la forêt. Par exemple, les profils verticaux en 2D donnent un aperçu sur la forme de la structure de l'arbre et donc sur le rôle écologique qu'il peut jouer. Ces données permettent d'observer le niveau de fermeture et

d'ouverture du couvert sans se soucier des effets de l'échantillonnage inégal ou de l'occlusion qui auraient un impact sur les interprétations écologiques du milieu.

7.3.3. Pour le climat

L'IST et la DST obtenus en sortie du processus de correction et de normalisation de la donnée lidar offrent des perspectives intéressantes pour ce qui a trait aux variables climatiques. En effet, pouvoir calculer finement la surface des feuilles d'une forêt ou le volume des matières végétales qu'elle contient donne une bonne indication sur sa capacité à agir sur les gaz à effet de serre comme le CO₂ par exemple. De plus, l'IST et plus particulièrement la DST permettent de savoir quelle est la de biomasse contenue dans un peuplement.

8. Conclusion

La méthode actuelle de L-Vox remplit pleinement l'objectif principal, car elle permet d'établir des profils verticaux de la distribution spatiale de la végétation à partir de nuages de points voxélisés qui s'approchent à plus de 90 % des profils de référence sur toutes les placettes. Les trois sous-objectifs ont eux aussi été atteints. Un gradient représentatif de placettes forestières a pu être simulé et scanné grâce à un simulateur de lidar-t à divers endroits dans la placette. L-Vox, premier algorithme de calcul d'un indice de densité corrigé de la végétation, a montré une précision remarquable sur la valeur de ces voxels par rapport aux voxels de référence, et ce pour les trois types de données (grille 3D, projection 2D, profil 1D) avec des coefficients de détermination R² compris entre 0,66 et 0,99. Cependant, la part substantielle des voxels qui subissent une occlusion importante du signal ($n_e < 10$) a nécessité le développement d'une nouvelle méthode complémentaire pour estimer leur valeur. Cette nouvelle méthode a été rendue possible grâce à l'utilisation des voxels voisins correctement calculés par L-Vox combiné avec celle d'une grille binaire. Bien que la méthode actuelle soit assez simple, elle permet tout de même d'obtenir des résultats au-dessus de nos attentes en ce qui concerne les profils verticaux et de très bons résultats pour les données 2D et 3D. Dans un second temps, l'utilisation de l'indice de densité relative (IDR), tel que procuré par L-Vox à l'origine, a montré ses limites au moment d'interpréter les résultats, car ils n'étaient pas comparables avec une unité de référence connue. C'est pourquoi une version

simplifiée de l'algorithme développé par Béland et al. (2011) a été mise au point de manière à obtenir des valeurs de densité exprimées en DST à partir de l'IDR. Avec cette conversion, les profils verticaux de végétation restent fidèles à la forme du profil de référence fourni par le modèle L-Architect sur l'ensemble de placettes de conifères simulées. Par ailleurs ils aboutissent aussi à donner des valeurs de DST en absolu relativement proches des valeurs données par le modèle car certaines pentes de régression linéaire ont un coefficient directeur proche de 1, malgré l'occlusion résiduelle. C'est particulièrement cette capacité à retrouver une valeur de DST plausible qui représente un défi pour l'algorithme L-Vox. En effet, il est important de pouvoir retrouver des profils verticaux de végétation finement reconstitués, mais il est primordial de pouvoir mettre des valeurs pertinentes sur ces profils pour les rendre exploitables par les professionnels de la forêt. Ceci suggère deux axes d'améliorations pour améliorer la précision du calcul. Le premier axe serait d'utiliser les coordonnées vectorielles réelles des rayons lancés par le lidar in situ de manière à se rapprocher le plus possible des tirs réels de l'instrument lidar au lieu d'utiliser un lancer de rayons théoriques qui s'écarte des patrons observés. Le deuxième serait de poursuivre les tests et les mesures de DST avec L-Vox pour l'étalonner au mieux en jouant sur ses paramètres influents, notamment le choix du paramètre de fusion des grilles, l'indice de groupage pour des conifères ou le taux de rayons entrants dans un voxel.

Pour finir dans un souci de validation approfondie de l'algorithme L-Vox, l'élargissement des tests à un jeu de placettes réelles en complément des placettes simulées s'est avéré utile. Ceci a d'abord permis de mettre en évidence les nombreuses différences qui résident entre une placette simulée et une placette issue de scans en forêt. Sur le plan forestier, son architecture est plus complexe, l'occlusion est présente dès les plus bas étages, le vent a pu altérer la mesure, tout comme le soleil, la pluie et le relief. Sur le plan des traitements, la manipulation de données réelles demande un alignement rigoureux des scans, un filtrage et une découpe appropriée. Ces étapes intermédiaires génèrent inévitablement des erreurs ou des approximations qui ne sont pas présentes avec la simulation de scans lidars sur des maquettes forestières. L'utilisation de ces placettes réelles avant et après dégagement d'un arbre cible avec plusieurs configurations de peuplement forestier a permis de mettre en évidence les limites de L-Vox face à l'occlusion forte voir totale du milieu. D'autre part, l'importance du choix de la taille des voxels a pu être mise en évidence en particulier dans les placettes peu structurées, qui augmentent la résilience aux erreurs et aide à satisfaire les

hypothèses de turbidité de la végétation à l'intérieur du voxel. Par conséquent, cette dernière campagne de validation de l'algorithme L-Vox s'est révélée complémentaire à la première approche par simulation de placettes reconstituées par L-Architect. Elle a permis de mettre à l'épreuve les deux méthodologies utilisées et d'identifier les faiblesses et les forces de chacune. D'une part, les placettes simulées offrent une vision idyllique de la réalité, mais elles restent une des seules solutions fiables pour évaluer rigoureusement la performance de l'algorithme L-Vox en n'ajoutant pas de biais dans les mesures. D'autre part, les placettes réelles présentent l'inconvénient majeur de rajouter des erreurs de mesure indépendantes de l'action de L-Vox, mais elles ont permis de mieux cerner les limites de cet algorithme dans les cas d'occlusion sévère. Cette remise en cause mutuelle des deux méthodes a été bénéfique pour mieux visualiser les apports et les limites de l'algorithme L-Vox.

Finalement, les nouvelles perspectives offertes par le lidar terrestre dans le cadre des inventaires forestiers sont très prometteuses et ne demandent qu'à gagner en maturité. Il soulève de nouvelles problématiques autant scientifiques que technologiques. Il garantit de révolutionner les méthodes d'inventaire avec de nombreuses possibilités innovantes dans la compréhension, la gestion et l'exploitation des ressources. Les techniques de voxélisation présentent un intérêt certain surtout dans le cadre des attributs de la couronne des arbres. Dans un milieu forestier ouvert, elle permet de quantifier finement et rapidement la végétation de manière non destructive, ce qui n'a jamais été possible jusqu'à présent. Par contre, cette technique reste relativement difficile à appliquer dans des environnements forestiers complexes et non structurés, car elles se butent encore à des obstacles en apparence infranchissables comme l'occlusion par exemple. Cependant, de nombreuses initiatives peuvent être mises en place pour contrer ce phénomène comme la fusion de données avec des lidars aéroportés, des approches par modélisation et prédiction de la végétation, ou encore l'amélioration des performances du capteur lidar.

9. Références

- Aschoff, T., & Spiecker, H. (2003). Algorithms for the automatic detection of trees. *IAPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI(8), 71–75.
- Baldocchi, D. D., & Harley, P. C. (1995). Scaling carbon dioxide and water vapour exchange from leaf to canopy in a deciduous forest. II. Model testing and application. *Plant, Cell and Environment*, 18(10), 1157–1173.
- Béland, M., Baldocchi, D. D., Widlowski, J.-L., Fournier, R. A., & Verstraete, M. M. (2014b). On seeing the wood from the leaves and the role of voxel size in determining leaf area distribution of forests with terrestrial LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 82–97.
- Béland, M., Widlowski, J.-L., & Fournier, R. A. (2014a). A model for deriving voxel-level tree leaf area density estimates from ground-based LiDAR. *Environmental Modelling and Software*, 51, 184–189.
- Béland, M., Widlowski, J.-L., Fournier, R. a., Côté, J.-F., & Verstraete, M. M. (2011). Estimating leaf area distribution in savanna trees from terrestrial LiDAR measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(9), 1252–1266.
- Boudreau, J.-F., & Philibert, Y. (2016a). *Placettes-échantillons permanentes*. Québec.
- Boudreau, J.-F., & Philibert, Y. (2016b). *Placette-échantillons temporaires*. Québec.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., & Treitz, P. (2004). Assessing the three-dimensional frequency distribution of airborne and ground-based lidar data for red pine and mixed deciduous forest plots. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*, XXXVI-8/W2, 66–70.
- Chen, J. M., & Black, T. and. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15, 421–429.
- Chen, J. M., & Cihlar, J. (1995). Quantifying the Effect of Canopy Architecture on Optical Measurements of Leaf Area Index Using Two Gap Size Analysis Methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(3), 777–787.
- Côté, J.-F., Fournier, R. a., & Egli, R. (2011). An architectural model of trees to estimate forest structural attributes using terrestrial LiDAR. *Environmental Modelling & Software*, 26(6), 761–777.
- Côté, J.-F., Fournier, R. A., Frazer, G. W., & Niemann, K. O. (2012). Agricultural and Forest Meteorology A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 167, 72–85.

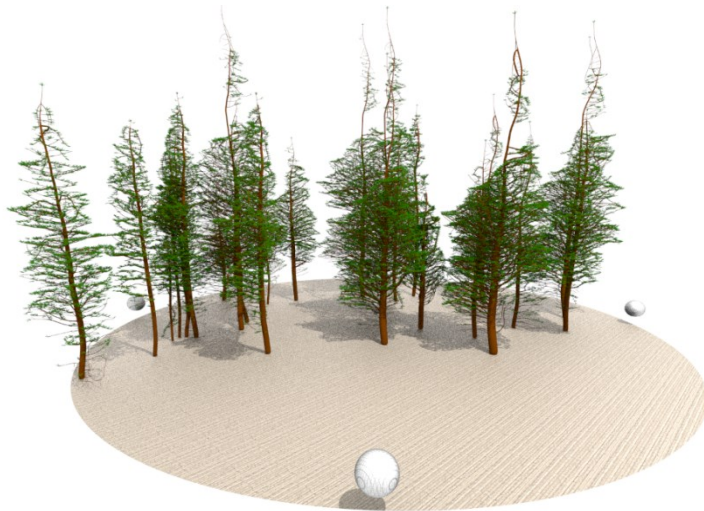
- Côté, J.-F., Widlowski, J.-L., Fournier, R. a., & Verstraete, M. M. (2009). The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 1067–1081.
- Durrieu, S., Allouis, T., Fournier, R. a., Véga, C., & Albrech, L. (2008). Spatial quantification of vegetation density from terrestrial laser scanner data for characterization of 3D forest structure at plot level. *SilviLaser 2008, Edinburgh*, (2004), 1–8.
- Duthoit, S. (2006). Prise en compte de l'agrégation des cultures dans la simulation du transfert radiatif : importance pour l'estimation de l'indice foliaire (*LAI*), *de la parcelle au paysage Jury*. Université Toulouse III.
- Fröhlich, C., & Mettenleiter, M. (2004). Terrestrial laser scanning – new perspectives in 3d surveying. *IAPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 7–13.
- Grace, J. C. (1987). Theoretical Ratio Between "One-Sided" and Total Surface Area For Pine Needles. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 17, 292–296.
- Grau, E., Durrieu, S., Fournier, R., Gastellu-Etchegorry, J. P., & Yin, T. (2017). Estimation of 3D vegetation density with Terrestrial Laser Scanning data using voxels. A sensitivity analysis of influencing parameters. *Remote Sensing of Environment*, 191, 373–388.
- Hall, R. J., Fernandes, R. a, Hogg, E. H., Brandt, J. P., Butson, C., Case, B. S., & Leblanc, S. G. (2003). Relating aspen defoliation to changes in leaf area derived from field and satellite remote sensing data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(3), 299–313.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., & Hall, R. J. (2008). The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal lidar datasets. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 1168–1180.
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-pow, C., & Treitz, P. (2004). Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3), 573–583.
- Hosoi, F., & Omasa, K. (2006). Voxel-Based 3-D Modeling of Individual Trees for Estimating Leaf Area Density Using High-Resolution Portable Scanning Lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12), 3610–3618.
- Hosoi, F., & Omasa, K. (2007). Factors contributing to accuracy in the estimation of the woody canopy leaf area density profile using 3D portable lidar imaging. *Journal of Experimental Botany*, 58(12), 3463–73.
- Hosoi, F., & Omasa, K. (2010). Estimation and error analysis of woody canopy leaf area density profiles using 3-d airborne and ground-based scanning lidar remote-sensing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(5), 2215–23.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M., & Baret, F. (2004).

- Review of methods for in situ leaf area index determination. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 19–35.
- Leblanc, S. G. (2014). *Étude de l'estimation de paramètres structuraux de la forêt à l'aide d'un cadre de modélisation, de la photographie hémisphérique et du LiDAR*. Savoirs UDES.
- Leblanc, S. G., Chen, J. M., Fernandes, R., Deering, D. W., & Conley, A. (2005). Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(3–4), 187–207.
- Lefsky, M. a., Cohen, W. B., Acker, S. a., Parker, G. G., Spies, T. a., & Harding, D. J. (1999). Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests. *Remote Sensing of Environment*, 70(3), 339–361.
- Lefsky, M. a., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience*, 52(1), 19.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., & Stewart, M. P. (2002). Ground-Based Laser Scanners: Operation, systems and applications *geomatca*, 56(I), 21–33.
- Lovell, J. L., Jupp, D. L. B., Culvenor, D. S., & Coops, N. C. (2003). Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 607–622.
- Martin-ducup, O., Schneider, R., & Fournier, R. (2016). Response of sugar maple (*Acer saccharum* , Marsh .) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. *Forest Ecology and Management*, 374(August), 20–32.
- Martin-ducup, O., Schneider, R., & Fournier, R. (2017). A method to quantify canopy changes using multi-temporal terrestrial lidar data : Tree response to surrounding gaps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238(May), 184–195.
- Méthot, S., Blais, L., Gravel, J., Latrémouille, I., St-Pierre, S., & Vézeau, S. (2014). *Guide d'inventaire et d'échantillonnage en milieu forestier*. Québec.
- Parker, G. G. (1995). Structure and Microclimate of Forest Canopies. In *Forest canopies*, M. Lowman & N. Nadkarni (Academic P, pp. 73–106). San Diego.
- Pharr, M., & Humphreys, G. (2010). *Physically Based Rendering, Second Edition*. (Morgan Kaufmann, Ed.) (2nd ed.). Amsterdam.
- Piboule, A. (2005). *Influence de la structure du peuplement forestier sur la distribution de l'éclairement sous couvert. Cas d'une forêt hétérogène feuillue sur plateau calcaire*. ENGREF.
- Picard, N. (2012). *Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres*. Montpellier.

- Pretzsch, H. (2009). Forest Dynamics, Growth, and Yield. In *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model* (pp. 1–39). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ross, J. (1981). *The radiation regime and architecture of plant stands (vol.3)*. (J. Ross, Ed.) (KLUWER ACA). Hague-Boston-London: Dr W. Junk Publishers.
- Seidel, D., Fleck, S., Leuschner, C., & Hammett, T. (2011). Review of ground-based methods to measure the distribution of biomass in forest canopies. *Annals of Forest Science*, 68(2), 225–244.
- Sellers, P. J., Dickinson, R. E., Randall, D. A., Betts, A. K., Hall, F. G., Berry, J. A., ... Henderson-Sellers, A. (1997). Modeling the Exchanges of Energy, Water, and Carbon Between Continents and the Atmosphere. *Science*, 275(5299), 502–509.
- Shan, J., & Toth, C. K. (2008). *Topographic Laser Ranging And Scanning : Principles and Processing*. (CRC Press, éd.).
- Simonse, M., Aschoff, T., Spiecker, H., & Thies, M. (2003). Automatic Determination of Forest Inventory Parameters. *Institute for Forest Growth*, 1–7.
- Strahler, A. H., Jupp, D. L. B., Woodcock, C. E., Schaaf, C. B., Yao, T., Zhao, F., ... Boykin-Morris, W. (2008). Retrieval of forest structural parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna ®). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 34(S2), S426–S440.
- Thies, M., Spiecker, H., & Str, T. (2000). Evaluation and Future Prospects of Terrestrial Laser Scanning for Standardized Forest Inventories. *IAPRS International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 192–197.
- Van der Zande, D., Hoet, W., Jonckheere, I., Van Aardt, J., & Coppin, P. (2006). Influence of measurement set-up of ground-based LiDAR for derivation of tree structure. *Agricultural and Forest Meteorology*, 141(2–4), 147–160.
- Watson, D. J. (1947). Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops. *Annals of Botany*, XI(41), 41–79.
- Wehr, A. (2008). LIDAR: Airborne and terrestrial sensors. *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*, 73–84.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I., & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121(1–2), 37–53.
- Wilkes, P., Lau, A., Disney, M. I., Calders, K., & Burt, A. (2017). Data Acquisition Considerations for Terrestrial Laser Scanning of Forest Plots. *Remote Sensing of Environment*, 196, 140–153.

- Zhao, K., García, M., Liu, S., Guo, Q., Chen, G., Zhang, Zhou, Y., Meng, X. (2015). Terrestrial lidar remote sensing of forests: Maximum likelihood estimates of canopy profile, leaf area index, and leaf angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, 209-210, 100-113.
- Zheng, G., & Moskal, L. M. (2009). Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors*, 9(4), 2719–2745.

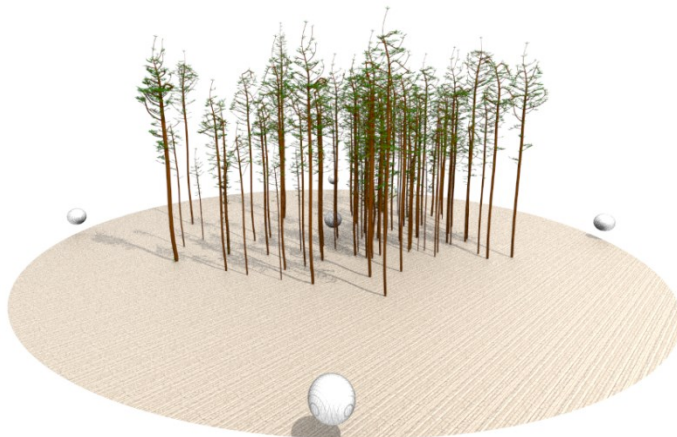
10. Annexe



101300317



18600518



18900805



19502312

Figure A1 - Rendu 3D des quatre placettes forestières de référence. avec PBRT

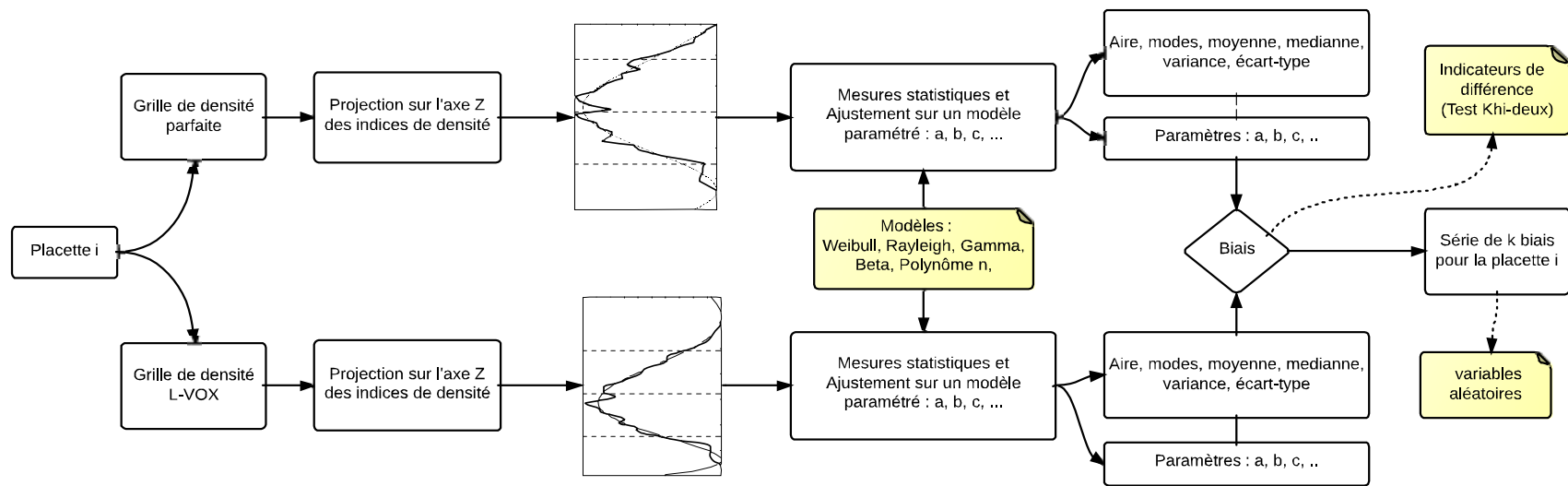


Figure A2 - Diagramme méthodologique de comparaison des profils verticaux.

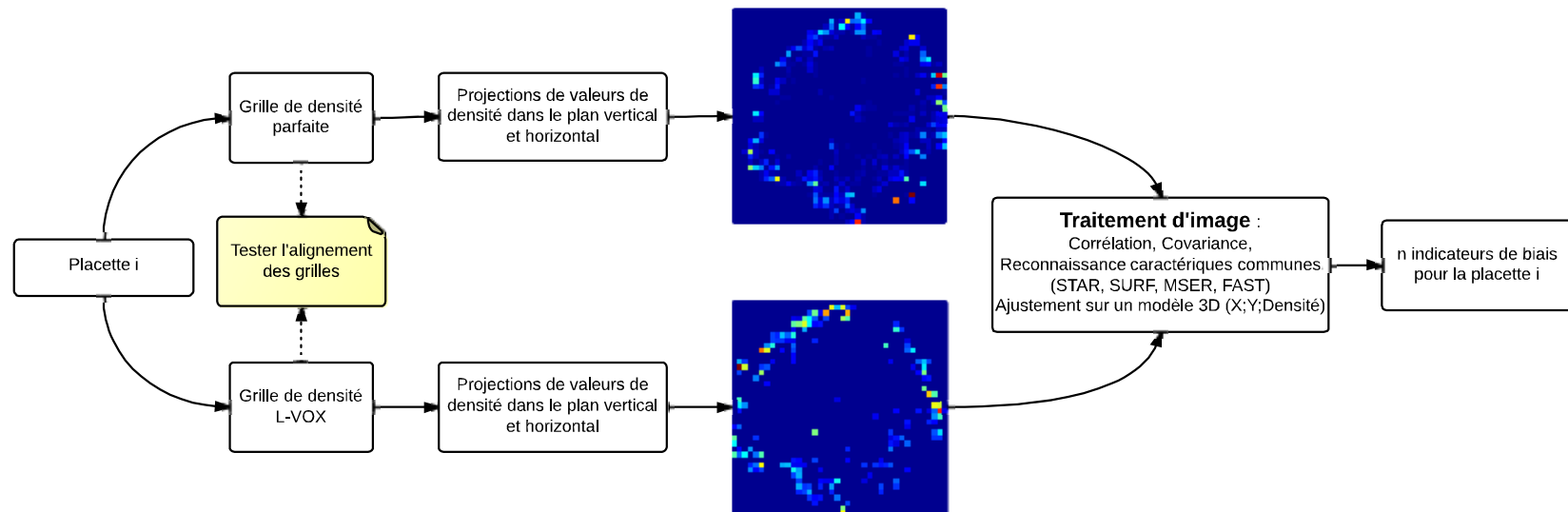
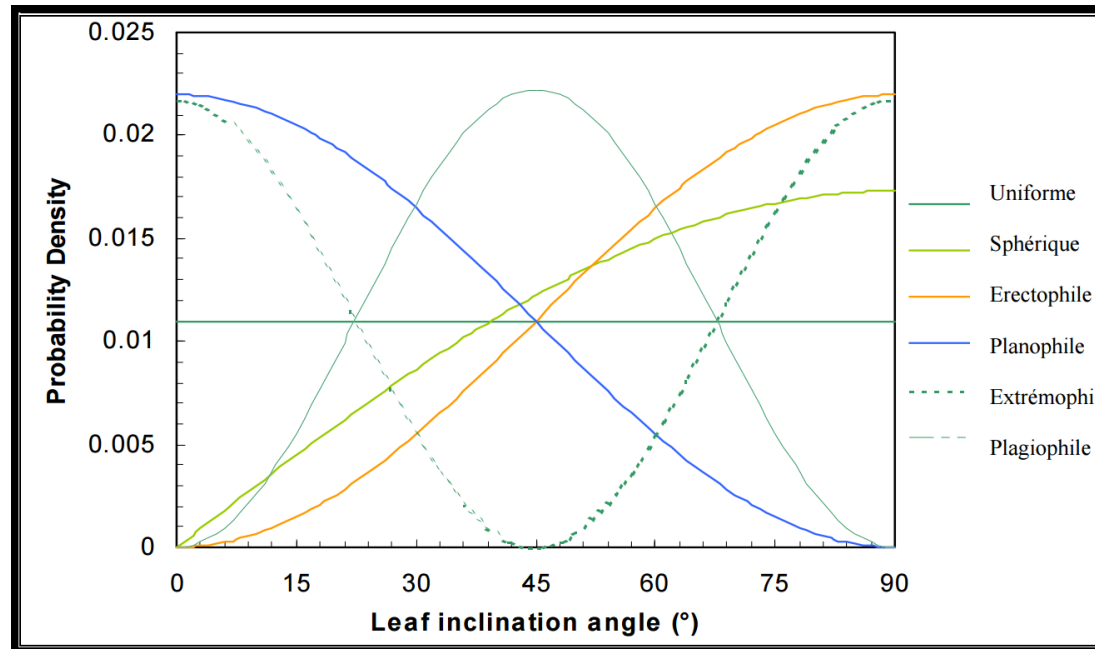


Figure A3 - Diagramme méthodologique de comparaison des projections 2D.

10.1. Rappel des équations sur la distribution du feuillage

Tableau A1 - Formules de distribution du feuillage (Weiss et al. 2004), voir figure 24. $g(\theta_1)$ est la fonction de distribution de l'inclinaison du feuillage (en prenant une fonction de distribution de l'angle azimutal des feuilles uniforme); ALIA signifie Average Leaf Inclination Angle (e.i. angle moyen d'inclinaison des feuilles) θ_1 ; et μ et ν sont les paramètres de la distribution beta.

Type de canopée	Inclinaison	$g(\theta_1)$	$G(\theta_1)$	ALIA, $\bar{\theta}_1$, (°)	$\langle \theta_1^2 \rangle$	μ	ν
Planophile	Horizontale	$2(1 + \cos(2\theta_1))/\pi$		26.8	1058.6	2.770	1.172
Erectophile	Vertical	$2(1 - \cos(2\theta_1))/\pi$		63.2	4341.4	1.172	2.770
Plagiophile	Oblique	$2(1 - \cos(4\theta_1))/\pi$		45.0	2289.6	3.326	3.326
Extremophile	Non oblique	$2(1 + \cos(4\theta_1))/\pi$		45.0	3110.3	0.433	0.433
Uniforme		$2/\pi$		45.0	2700.0	1.000	1.000
Sphérique		$\sin(\theta_1)$	1/2	57.3	3747.6	1.101	1.930



La distribution Beta (Goel & Strebel, 1984): l'inclinaison des feuilles dépend de la fonction gamma et de deux paramètres, μ et ν . Ces paramètres sont relatifs à l'angle moyen d'inclinaison des feuilles (ALIA), $\bar{\theta}_1$, et à son second moment $\langle \theta_1^2 \rangle$ (Goel, 1988):

$$\begin{cases} \bar{\theta}_1 = \frac{90\nu}{\mu+\nu} \\ \langle \theta_1^2 \rangle = \frac{90^2\nu(\nu+1)}{(\mu+\nu)(\mu+\nu+1)} \end{cases}$$

Figure A4 - Densité de probabilité en fonction de l'inclinaison des feuilles.

10.2. Prérequis à l'utilisation de L-VOX

(exemple d'une scène composée de 5 scans) :

- Les 5 scans doivent avoir été correctement **alignés** et **projetés** dans un seul système de coordonnées.
- Avoir 5 fichiers de points, à raison de 1 fichier ASCII (ASC.XYZ.RGB ou ASC.XYZ) par scan (aligné).
- Avoir le rapport d'alignement qui contient les coordonnées XYZ à l'origine et les transformations d'alignement (rotation, translation) pour chacun des 5 scans.
- Avoir les coordonnées de la bounding box (BB = zone d'intérêt) ou par défaut la zone d'inclusion de tous les points (défini par les deux points les plus éloignés du nuage). De plus, L-Vox propose par défaut une zone d'intérêt cylindrique de 20m de diamètre autour du scan central, donc il n'est pas nécessaire de créer une BB plus petite que la zone d'inclusion de tous les points en prétraitement.
- Tous les points retournés dans la bounding box (BB = zone d'intérêt) comptent ! C'est-à-dire qu'il ne faut pas filtrer ni supprimer des éléments dans la BB. Par contre tous les points en dehors peuvent être filtrés ou supprimés (range filter), cela n'impactera pas l'algorithme L-Vox. Cependant, les points d'intensité < 25 % sont supprimés même dans la BB, car ils peuvent être considérés comme des points « fantômes ». C'est-à-dire qu'ils appartiennent à un rayon qui n'a rencontré aucun obstacle, que ses coordonnées sont aléatoires et qu'il peut être supprimé, car considéré par défaut hors BB.
- Finalement, créer le fichier input (nom_du_fichier.in) qui regroupe toutes les informations d'une scène selon le patron suivant avec:
 - P_{min} et P_{max} les deux points les plus éloignés du nuage total (définir la BB).
 - Marque du capteur: **FARO®** ou **Z+F®**
 - P_{λ} est la position du scan λ .
 - R_{λ} est la résolution angulaire du scan λ : 0.036° pour une résolution dite moyenne.
 - $A_{\lambda min}$ et $A_{\lambda max}$ sont les angles d'ouverture azimutaux (horizontaux) du scan λ en degrés (par défaut 0° 180°).
 - $Z_{\lambda min}$ et $Z_{\lambda max}$ sont les angles d'ouverture zénithaux (verticaux) du scan λ en degrés (par défaut 25° 335°).

Patron:

$P_{min.x}$ $P_{min.y}$ $P_{min.z}$ $P_{max.x}$ $P_{max.y}$ $P_{max.z}$

nom_du_scan_central.asc **Z+F** $P_{0.x}$ $P_{0.y}$ $P_{0.z}$ R_{λ} A_{0min} A_{0max} Z_{0min} Z_{0max}

nom_du_scan_périph1.asc **Z+F** $P_{1.x}$ $P_{1.y}$ $P_{1.z}$ R_{λ} A_{1min} A_{1max} Z_{1min} Z_{1max}

nom_du_scan_périph2.asc **Z+F** $P_{2.x}$ $P_{2.y}$ $P_{2.z}$ R_{λ} A_{2min} A_{2max} Z_{2min} Z_{2max}

nom_du_scan_périph3.asc **Z+F** P₃.x P₃.y P₃.z R_λ A_{3min} A_{3max} Z_{3min} Z_{3max}
 nom_du_scan_périph4.asc **Z+F** P₄.x P₄.y P₄.z R_λ A_{4min} A_{4max} Z_{4min} Z_{4max}

Une ligne par scan et chaque champ doit être séparé par un seul espace. Le fichier input doit avoir l'extension .in et être placé dans le même répertoire que les fichiers de points.

Exemple :

-5 -5 -2 26 17 10

Bras_David_II -1.xyz.asc Z+F 0.000 0.000 0.000 0.036 0 180 25 335

Bras_David_II -2.xyz.asc Z+F 4.316 -11.762 -0.893 0.036 0 180 25 335

Bras_David_II -3.xyz.asc Z+F -10.895 -4.842 -0.572 0.036 0 180 25 335

Bras_David_II -4.xyz.asc Z+F -2.110 9.479 1.065 0.036 0 180 25 335

Bras_David_II -5.xyz.asc Z+F 9.577 -2.453 -0.016 0.036 0 180 25 335